ICHIO
INSTITUTO CHILENO DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA

Universidad Católica del Norte

In collaboration with

Universidad de los Andes

XV CHILEAN CONFERENCE ON OPERATIONS RESEARCH

OPTIMA 2025

Universidad Católica del Norte
Campus Guayacán

Coquimbo, Chile
November 30th – December 3rd, 2025

hexaly IFORS AMPL CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN VIÑA CONCHA Y TORO

CCU LOS PELAMBRES ANTOFAGASTA MINERALS Santander

Proceedings of the XV Chilean Conference on Operations Research

OPTIMA 2025

Universidad Católica del Norte
Campus Guayacán, Coquimbo
November 30th – December 3rd, 2025

Universidad Católica del Norte
1956 — 2026

Proceedings of the XV Chilean Conference on Operations Research

https://doi.org/10.82218/OPTIMA2025

© The copyright of each paper remains with its respective author(s). The content is published under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

Editors:

Rosa G. González-Ramírez https://orcid.org/0000-0001-8029-5432
Carlos A. Monardes-Concha https://orcid.org/0000-0003-0115-7635

Universidad Católica del Norte
Domicilio Legal: Larrondo 1281, Coquimbo, Región de Coquimbo, Chile.
Representante Legal: Rectora María Cecilia Hernández Vera.

Registro de Propiedad Intelectual N°2025-X-XXXXXX

Coordination and editing:

César Muñoz Francke /cesar-munoz-francke

Photographs:

Jorge Ramirez Alvarez ramirez.j.doc@gmail.com

No generative AI tools were used in the production of this document.

Coquimbo, March 2026.

https://ror.org/02akpm128

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Use, distribution, and adaptation of the content are permitted, provided that proper credit is given to the original source. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Table of Contents

1 Forewords **6**
1.1 Foreword from the Program Committee Chair . . . 7
1.2 Foreword from the Conference Committee Chair . . . 8
1.3 Foreword from the ICHIO President . . . 9

2 Conference Organization **10**
2.1 Organizing Committee . . . 11
2.2 Program Committee . . . 11
2.3 ICHIO Board . . . 12
2.4 ICHIO Congress . . . 12

3 Conference Schedule **14**
3.1 Monday, December 1st . . . 15
3.2 Tuesday, December 2nd . . . 15
3.3 Wednesday, December 3rd . . . 15

4 Plenary Speakers **16**
4.1 Keynote N°1 . . . 17
4.2 Keynote N°2 . . . 18
4.3 Keynote N°3 . . . 19
4.4 Keynote N°4 . . . 20

5 Accepted Contributions **21**
5.1 Session N°1 . . . 22
5.1.1 Track N°1: Stochastic and Robust Optimization . . . 22
5.1.2 Track N°2: Operations Research Applications . . . 33
5.1.3 Track N°3: Combinatorial Optimization . . . 44
5.1.4 Track N°4: Analytics and Artificial Intelligence . . . 57
5.2 Session N°2 . . . 71
5.2.1 Track N°1: Vehicle Routing Problem (VRP) . . . 71
5.2.2 Track N°2: OR Applications in Agriculture and Cities . . . 82
5.2.3 Track N°3: OR Applications in Supply Chain . . . 93
5.2.4 Track N°4: Network Design and Location . . . 104
5.3 Session N°3 . . . 113
5.3.1 Track N°1: Analytics and Artificial Intelligence . . . 113
5.3.2 Track N°2: Port Logistics . . . 123
5.3.3 Track N°3: Efficiency and Performance . . . 131
5.3.4 Track N°4: Network Design and Location . . . 143
5.4 Session N°4 . . . 152
5.4.1 Track N°1: OR Applications in Agriculture . . . 152
5.4.2 Track N°2: Scheduling . . . 163
5.4.3 Track N°3: Waste Management and Recycling . . . 171
5.4.4 Track N°4: Network Design and Location . . . 182
5.5 Session N°5 . . . 195
5.5.1 Track N°1: Doctoral Theses . . . 195
5.5.2 Track N°2: OR Applications in Energy . . . 206
5.5.3 Track N°3: OR Applications in Healthcare . . . 222
5.5.4 Track N°4: Multi-objective Optimization . . . 232
5.6 Session N°6 . . . 243

5.6.1 Track N°1: Master's and Bachelor's Theses . . . 243
5.6.2 Track N°2: OR Applications in Healthcare . . . 259
5.6.3 Track N°3: Network Design and Location . . . 268
5.6.4 Track N°4: OR Applications and Artificial Intelligence . . . 280
5.7 Session N°7 . . . 292
5.7.1 Track N°1: OR Applications in Agriculture . . . 292
5.7.2 Track N°2: Last Mile Logistics . . . 301
5.7.3 Track N°3: Network Design and Location . . . 311
5.7.4 Track N°4: Operations Research Applications . . . 318
5.8 Session N°8 . . . 329
5.8.1 Track N°1: Public Transportation . . . 329
5.8.2 Track N°2: Stochastic and Robust Optimization . . . 337
5.8.3 Track N°3: Vehicle Routing Problem (VRP) . . . 349
5.8.4 Track N°4: OR Applications and Simulation . . . 358
5.9 Session N°9 . . . 369
5.9.1 Track N°1: Analytics and Artificial Intelligence . . . 369
5.9.2 Track N°2: OR Applications in Healthcare . . . 381
5.9.3 Track N°3: Vehicle Routing Problem (VRP) . . . 389
5.10 Session N°10 . . . 400
5.10.1 Track N°1: Last Mile Logistics . . . 400
5.10.2 Track N°2: Network Design and Location . . . 410
5.10.3 Track N°3: Analytics and Artificial Intelligence . . . 421
5.10.4 Track N°4: Operations Research Applications . . . 429

6 Index of Authors 437

Forewords

hexaly

IFORS
INTERNATIONAL FEDERATION OF OPERATIONAL RESEARCH SOCIETIES

AMPL

CENTRO DE
INVESTIGACIÓN
E INNOVACIÓN
VIÑA CONCHA Y TORO

CCU

LOS PELAMBRES
ANTOFAGASTA MINERALS

Santander

Foreword from the Program Committee Chair

We are delighted to gather once again under the auspices of the Chilean Institute of Operations Research (ICHIO) for this biennial meeting, academics, practitioners, and students from Chile and around the world, with a shared passion for advancing the field of Operations Research. Since the first OPTIMA held in 1995, our community has grown remarkably, reflecting the increasing importance of optimization, analytics, and decision-making methods across science, industry, and public policy.

Operations Research continues to evolve, driven by challenges that demand innovative models, robust algorithms, and impactful applications. Today, our discipline sits at the intersection of mathematical theory, artificial intelligence, and real-world problem-solving, spanning logistics and supply chain design, healthcare systems, energy networks, agricultural systems, and beyond. OPTIMA 2025 featured 145 talks whose main topics reflect this rich diversity, spanning stochastic and robust optimization, vehicle routing, network design, analytics and AI, healthcare and energy applications, maritime logistics, and multi-objective optimization, among others.

Furthermore, during the conference, nine finalists presented their work for the bachelor's, master's, and doctoral best thesis awards. The award was granted to Marcel Favereau for the doctoral thesis, Matías de Geyter for the master's thesis, and Valentina Vilches for the bachelor's thesis. In total, 154 presentations were scheduled across 39 sessions.

The participation of international leaders such as Ph.D. Héctor Cancela Bosi, Ph.D. Sarfaraz Hashemkhani Zolfani, Ph.D. José Fernando Camacho Vallejo, Ph.D. Marcela González Araya highlights the global scope and relevance of OPTIMA's scientific agenda.

We extend our deepest gratitude to the organizing committee, volunteers, reviewers, sponsors, and supporting institutions, including Universidad Católica del Norte, for hosting this event at the beautiful Campus Guayacán in Coquimbo. Their dedication and effort have been essential to bringing this inspiring program together.

We also want to thank our sponsors for their support. Hexaly as the golden sponsor of the event, AMPL as the bronze sponsor, Santander Bank, Research and Innovation Center, Concha y Toro winery, Los Pelambres Mining company, CCU Transport, and IFORS for partially sponsoring the participation of one of our keynote speakers.

To all participants, thank you for your enthusiasm, curiosity, and commitment. We hope OPTIMA 2025 is not only a venue for presenting cutting-edge research but also a platform for forging new collaborations and shaping the future of Operations Research across disciplines and borders.

On behalf of the Program Committee of OPTIMA 2025,

Rosa G. González, Ph.D.
Program Committee Chair

Foreword from the Conference Committee Chair

Welcome to the XV Chilean Conference on Operations Research, OPTIMA 2025!

It is an honor to welcome the community of the Universidad Católica del Norte (UCN), distinguished authorities, sponsors, and all participants to our Campus Guayacán in Coquimbo. The journey to this event began at the 2023 IFORS conference in Santiago, where members of the Chilean Institute of Operations Research (ICHIO) entrusted UCN with the responsibility of hosting this fifteenth edition. This gathering marks a significant return to Northern Chile, a decade after the conference last met in Antofagasta in 2015.

We organized this conference with the firm conviction that the Coquimbo region presents unique challenges and opportunities that can be addressed through Operations Research, Analytics, and Artificial Intelligence. As our field moves from descriptive insights to predictive and prescriptive analytics, the tools developed by this community remain essential for turning information into intelligent decisions. Throughout these days, we explore how these methodologies solve large-scale problems in vital industries such as Mining, Energy, Agriculture, and Port Operations, while addressing critical regional issues like Water Scarcity to improve our community's quality of life.

This edition has been particularly successful in attracting a diverse group of 185 participants. While the majority of our attendees hail from Chile (88.44%), we are proud to host an international delegation representing Mexico, Colombia, Uruguay, the Czech Republic, the United States, and Germany, among others. This diversity is further reflected in the institutional participation, led by Universidad Católica del Norte (15%) and Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (13%), alongside many other Chilean and foreign universities dedicated to sharing knowledge and building future ties.

Making such a conference is not a small task, and it was only possible thanks to the commitment of many. I want to express my deepest gratitude to the Organizing Committee and the Academic Committee, led by Rosa González, as well as the Universidad de los Andes, for their steadfast support. We also extend our sincere thanks to our sponsors: Hexaly and Fred Gardi for their early interest; AMPL and Eduardo Salazar; Minera Los Pelambres for their collaboration in regional development; CCU Transport and Milton Pérez; Viña Concha y Toro through its Center for Research and Innovation (CII), IFORS, and Santander Bank.

We trust that XV OPTIMA 2025 has been a rewarding experience for all participants. Finally, we invite you to continue this tradition of excellence as we look forward to our next meeting, XVI OPTIMA 2027, to be held in Valparaíso.

Carlos A. Monardes Concha, Ph.D.
Conference Committee Chair

Foreword from the ICHIO President

The OPTIMA 2025 conference has brought together a great number of researchers from Chile, as well as friends from other countries. This conference is the main Operations Research meeting in our country, with a steady tradition of over two decades.

Operations Research is a discipline that is becoming increasingly relevant in today's world. The complexity of current problems across diverse fields, such as healthcare systems, energy resource management, logistics, and many others, means that decision-making processes increasingly require the support of powerful analytical tools. These are exactly what the field of Operations Research provides, coupled with ever more capable computational techniques.

These issues have allowed Operations Research to demonstrate its lasting impact worldwide and, of course, in Chile as well. The papers presented at OPTIMA 2025 showcase precisely that vast diversity of application areas and the impact that can be achieved through solid analytical tools.

ICHIO would like to thank the conference organizers, particularly Professor Carlos Monardes and his team at Universidad Católica del Norte, and the Program Committee, led by Professor Rosa González, who put together an outstanding conference with an excellent scientific program. Furthermore, we want to thank all the participants of OPTIMA 2025.

We look forward to seeing you at OPTIMA 2027!

Jorge Vera Andreo, Ph.D.
President of the Chilean Institute of Operations Research (ICHIO)

Conference Organization

Organizing Committee

- **Carlos Monardes Concha**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Paul Leger Morales**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Pablo Miranda González**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Sarfaraz Hashemkhani**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Jorge Tabilo Álvarez**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Francisco Tapia Ubeda**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Dámaris Dávila**, Universidad de los Andes Chile, Chile.
- **Carla Vairetti**, Universidad de los Andes Chile, Chile.

Program Committee

- **Rosa G. González Ramírez**, Universidad de los Andes Chile, Chile.
- **Marcela González**, Universidad de Talca, Chile.
- **Vladimir Marianov**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- **Sarfaraz Hashemkhani**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Jorge Vera**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- **Franco Basso**, Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- **Sebastián Maldonado**, Universidad de Chile, Chile.
- **Pablo Miranda**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Karol Suchan**, Universidad Diego Portales, Chile.
- **Alfredo Candia**, Universidad Finnis Terrae, Chile.
- **Jaime Miranda**, Universidad de Chile, Chile.
- **Alejandro Mac Cawley**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- **Sergio Maturana**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- **Virna Ortiz**, Universidad del Bío-Bío, Chile.
- **Germán Paredes**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- **Eduardo Moreno**, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile.
- **Jessica Bull**, Universidad Austral, Chile.
- **Javier Gómez**, Universidad Católica del Maule, Chile.
- **Amir Karbassi**, Universidad de Tarapacá, Chile.
- **Víctor Albornoz**, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- **Eduardo Lalla**, Universidad de Twente, Chile.
- **Rodrigo Linfati**, Universidad del Bío-Bío, Chile.
- **Gabriel Gutiérrez**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- **Rodrigo Carrasco**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- **Yurilev Chalco**, Universidad de Tarapacá, Chile.
- **Héctor Cancela**, Universidad de la República, Uruguay.
- **Lluís Plá-Aragonés**, Universidad de Lleida, Spain.
- **José-Fernando Camacho**, Tecnológico de Monterrey, Mexico.
- **Andrea Espinoza**, Universidad de Santiago de Chile, Chile.
- **Lorena Pradenas**, Universidad de Concepción, Chile.
- **Lorena Bearzotti**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- **Antonio Mautonne**, Universidad de la República, Uruguay.
- **Yasmín Ríos**, Tecnológico de Monterrey, Mexico.
- **Vivian Segovia**, Universidad Arturo Prat, Chile.

- **Pablo Rey**, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile.
- **Emilio Carrizosa**, Universidad de Sevilla, Spain.
- **Rosemarie Santa**, Georgia Tech, USA.
- **Juan Villegas**, Universidad de Antioquia, Colombia.
- **Pablo Becerra**, Universidad de Atacama, Chile.
- **Javier Marenco**, Universidad Torcuato Di Tella, Argentina.
- **Francisco Tapia**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Paulo Alves**, Universidad Católica del Norte, Chile.
- **Mathias Klapp**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- **Alice Smith**, Auburn University, USA.
- **Celso Ribeiro**, Universidade Federal Fluminense, Brazil.
- **Julio López**, Universidad Diego Portales, Chile.
- **Eduardo Álvarez**, Universidad de Talca, Chile.
- **Jana Ries**, University of Portsmouth, United Kingdom.
- **Bismark Singh**, University of Southampton, United Kingdom.
- **Pamela Álvarez**, Universidad Andrés Bello, Chile.
- **Gustavo Gatica**, Universidad Andrés Bello, Chile.
- **Tito Homem-de-Mello**, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile.
- **Gustavo Angulo**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.
- **Oscar Vásquez**, Universidad de Santiago de Chile, Chile.
- **Roger Ríos**, Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico.
- **Mariano Frutos**, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

ICHIO Board

- **Jorge Vera**, Pontificia Universidad Católica de Chile, President.
- **Mauricio Varas**, Universidad del Desarrollo, First Vice-President.
- **Armin Lüer**, Universidad Andrés Bello, Second Vice-President.
- **Hanns de la Fuente,** Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Excecutive Director.
- **Rodrigo Carrasco**, Pontificia Universidad Católica de Chile, Treasurer.
- **Gustavo Gatica**, Universidad Andrés Bello, Secretary.
- **Víctor Albornoz**, Universidad Técnica Federico Santa María, Past-President.

ICHIO Congress

The Chilean Congress of Operations Research, OPTIMA, is a biannual congress organized by the Chilean Institute of Operations Research (ICHIO).

OPTIMA has been held since 1995, with its first edition in Santiago, organized by academics from the Universidad de Chile. Since then, the OPTIMA congress has been organized every 2 years, with some exceptions, by different universities in several cities in Chile. The following list shows all OPTIMA's versions, including the most recent one, along with the organizers and the location where it took place.

- **XV OPTIMA (2025)** – Universidad Católica del Norte, Coquimbo.
- **XIV OPTIMA (2022)** – Universidad Católica del Maule, Talca.
- **XIII OPTIMA (2019)** – Universidad de Santiago de Chile, Santa Cruz.
- **XII OPTIMA (2017)** – Universidad Adolfo Ibáñez, Viña del Mar.
- **XI OPTIMA (2015)** – Universidad Católica del Norte, Antofagasta.
- **X OPTIMA (2013)** – Universidad de Concepción, Concepción.
- **IX OPTIMA (2011)** – Universidad de la Frontera, Pucón.

- **VIII OPTIMA (2009)** – Universidad del Bío-Bío, Chillán.
- **VII OPTIMA (2007)** – Universidad de los Lagos, Puerto Montt.
- **VI OPTIMA (2005)** – Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- **V OPTIMA (2003)** – Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
- **IV OPTIMA (2001)** – Universidad de Talca, Curicó.
- **III OPTIMA (1999)** – Universidad de Tarapacá, Arica.
- **II OPTIMA (1997)** – Universidad de Concepción, Concepción.
- **I OPTIMA (1995)** – Universidad de Chile, Santiago.

On each version of this congress, ICHIO has sought to establish connections between students, academics, and researchers, in order to contribute to the dissemination and exchange of ideas and knowledge in the different topics addressed by operations research.

Conference Schedule

Parallel Sessions Overview

Monday, December 1st

Session N°1	G6-054	Stochastic and Robust Optimization
10:40 – 11:55	G6-055	Operations Research Applications
	G6-056	Combinatorial Optimization
	X-103	Analytics and Artificial Intelligence
Session N°2	G6-054	Vehicle Routing Problem (VRP)
12:10 – 13:25	G6-055	OR Applications in Agriculture and Cities
	G6-056	OR Applications in Supply Chain
	X-103	Network Design and Location
Session N°3	G6-054	Analytics and Artificial Intelligence
15:40 – 16:55	G6-055	Port Logistics
	G6-056	Efficiency and Performance
	X-103	Network Design and Location
Session N°4	G6-054	OR Applications in Agriculture
17:30 – 18:45	G6-055	Scheduling
	G6-056	Waste Management and Recycling
	X-103	Network Design and Location

Tuesday, December 2nd

Session N°5	X-103	Doctoral Theses
08:30 – 09:45	G6-054	OR Applications in Energy
	G6-055	OR Applications in Healthcare
	G6-056	Multi-objective Optimization
Session N°6	X-103	Master's and Bachelor's Theses
10:30 – 11:45	G6-054	OR Applications in Healthcare
	G6-055	Network Design and Location
	G6-056	OR Applications and Artificial Intelligence
Session N°7	G6-054	OR Applications in Agriculture
14:00 – 15:15	G6-055	Last Mile Logistics
	G6-056	Network Design and Location
	X-103	OR Applications
Session N°8	G6-054	Public Transportation
15:30 – 16:45	G6-055	Stochastic and Robust Optimization
	G6-056	Vehicle Routing Problem (VRP)
	X-103	OR Applications and Simulation

Wednesday, December 3rd

Session N°9	G6-054	Analytics and Artificial Intelligence
08:30 – 09:45	G6-055	OR Applications in Healthcare
	G6-056	Vehicle Routing Problem (VRP)
Session N°10	G6-054	Last Mile Logistics
10:00 – 11:15	G6-055	Network Design and Location
	G6-056	Analytics and Artificial Intelligence
	X-103	OR Applications

Plenary Speakers

Keynote N°1

Assignment Models for the Inclusion of People with Disabilities in Administrative Tasks

Plenary Speaker: Héctor Cancela Bosi *(Universidad de la República)*
Place: Campus Auditorium
Time: Monday, December 1st, 09:30 – 10:30

Nowadays, organizations seek to increase the diversity of their workforce. In this context, the inclusion of people with disabilities in the workplace represents an opportunity both to enrich work teams and to contribute to the social responsibility of institutions. At the same time, addressing individual characteristics and the requirements of different tasks poses a significant challenge. In this presentation, we discuss a case study corresponding to an experience carried out with the Municipality of Montevideo, within the framework of hiring interns through agreements with organizations of people with disabilities, to perform tasks in the Citizen Services Department.

The overall objective of the project was to achieve the best possible placement of individuals in the assigned jobs and tasks. This involved a stage of physical assessment of offices and tasks to be performed, identification of necessary adaptations, and essential and desirable requirements, as well as an assessment of the capabilities, requirements, and preferences of potential interns. A manual assignment and a mathematical programming model were developed, with several variants of the objective function, which made it possible to evaluate the quality of solutions according to different criteria and to obtain an assignment that takes into account both the availability and characteristics of the jobs and the capacities, experience, and preferences of the individuals, with results regarded as highly satisfactory by all parties involved.

Héctor Cancela Bosi

Héctor Cancela is a Systems and Computer Engineering graduate (Universidad de la República, 1990) and holds a Ph.D. in Computer Science (Université de Rennes 1 / INRIA, France, 1996). He is Full Professor (Grade 5) in the Operations Research Department of the Institute of Computing, Faculty of Engineering, Universidad de la República. He has published more than 100 full papers in peer-reviewed international journals and conference proceedings. He has supervised more than 20 completed master's and doctoral theses and has participated in over 30 research projects funded by national and international agencies. He served as President of the Latin-Ibero-American Association of Operations Research (ALIO) and President of the Latin American Center for Informatics Studies (CLEI), and he is currently President of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS) for the 2025–2027 triennium.

Keynote N°2

Iterative Execution of MCDM with 3-Way Decisions as a Form of Structural Sensitivity Analysis: An Introduction to 3-Way Decision–Based Alternative Filtering Sensitivity (3WD-AFS)

Plenary Speaker: Sarfaraz Hashemkhani Zolfani *(Universidad Católica del Norte)*
Place: Campus Auditorium
Time: Monday, December 1st, 14:30 – 15:30

This presentation introduces a new perspective on decision-making under uncertainty by demonstrating how iteratively executed Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), combined with 3-Way Decisions (3WD), naturally functions as a form of Structural Sensitivity Analysis. Traditional sensitivity analysis in MCDM typically covers changes in weights, criteria, or input data, but these approaches overlook one fundamental dimension: the sensitivity of the model to changes in the set of alternatives itself. Given the successive elimination of weak alternatives, the changes in the normalization structure, in the pattern of distances, and in ideal solutions are often large. This type of structural reconfiguration can render previously acceptable or deferred alternatives unacceptable, thereby revealing instabilities that are not captured by traditional sensitivity methods.

The presentation formalizes this intuition by introducing the new analytical framework of 3WD-Based Alternative Filtering Sensitivity, which captures how alternative elimination influences the geometry and robustness of the decision space. The approach shows that truly strong alternatives remain stable across iterative cycles, while marginal ones are highly volatile. This gives deeper insight to the decision-makers about the resilience, dominance, and reliability of their final choices. Overall, 3WD-AFS offers a powerful new tool for evaluating structural robustness in MCDM models and enhancing transparency, credibility, and interpretability in complex real-world decisions.

Sarfaraz Hashemkhani Zolfani

Ph.D. Sarfaraz Hashemkhani Zolfani is an Associate Professor at the School of Engineering of the Universidad Católica del Norte, Coquimbo campus, Chile. He is also a Visiting Professor at the University of Portsmouth under the Isambard Kingdom Scholarship Programme. He serves as an Associate Editor of the journals Engineering Applications of Artificial Intelligence, Artificial Intelligence Review, and Fuzzy Extensions & Applications. He is also a member of the editorial boards of several journals, including Financial Innovation, Technological and Economic Development of Economy, International Journal of Strategic Property Management, Transport, Journal of Dynamics and Games, Decision Making: Applications in Management and Engineering, and Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications, among others.

Ph.D. Hashemkhani Zolfani has been recognized among the top 2% most cited researchers worldwide since 2022. He has maintained this distinction for three consecutive years (2022, 2023, and 2024), according to the annual rankings published by Stanford University in collaboration with Elsevier. He actively serves as a reviewer for more than 100 journals indexed in ISI and Scopus.

Keynote N°3

Bilevel Optimization Approaches for Hierarchical Decisions in Supply Chains

Plenary Speaker: José-Fernando Camacho-Vallejo *(Tecnológico de Monterrey)*
Place: Campus Auditorium
Time: Tuesday, December 2nd, 12:00 – 13:00

Supply chains are complex networks involving multiple stakeholders. In many cases, a central coordinator seeks to optimize a problem according to a specific objective that represents the interests of all stakeholders. However, various situations arise in which it is important to explicitly model the different stakeholders and the relationships among them, particularly when each party makes its own decisions within the network. Frequently, a hierarchy exists among stakeholders. This hierarchical structure may also appear within a single company, where different decision makers control different parts of the system while pursuing their own objective functions.

In such settings, a higher-hierarchy decision maker aims to optimize its objective function by choosing decisions that constrain the feasible space available to a lower-hierarchy decision maker; which in turn, seeks to make the best possible decision given its own objective function and the restrictions imposed by the higher-hierarchy decision maker. This hierarchical interaction means that decisions of the lower-hierarchy decision maker influence either the feasible region or the objective function of the higher-hierarchy problem. Bilevel programming models are used to represent and analyze these interdependent decision-making processes.

In this presentation, we will discuss the characteristics and challenges of bilevel optimization models, along with common solution approaches, with particular emphasis on metaheuristics. We will also present two illustrative applications of bilevel models in supply chain and logistics settings and highlight promising research directions in this area.

José-Fernando Camacho-Vallejo

José Fernando Camacho Vallejo holds a B.Sc. in Mathematics from the Faculty of Physical and Mathematical Sciences of UANL (1998), an M.Sc. in Engineering Sciences with a specialization in Industrial Engineering from Arizona State University (2004), and a Ph.D. in Engineering Sciences with a specialization in Industrial Engineering from Tecnológico de Monterrey (2010). He has been a Full Professor and Researcher in the Department of Mathematics at the Faculty of Physical and Mathematical Sciences of UANL since January 2009, where he conducts research in bilevel programming, metaheuristics, and supply chain optimization. He is a Level II member of the National System of Researchers (SNI), a regular member of the Mexican Academy of Sciences, and holds the desirable PRODEP profile. He has published more than 30 articles in JCR-indexed journals, with over 1,200 citations on Google Scholar. He has supervised 5 doctoral theses, 12 master's theses, 3 undergraduate theses, and 3 postdoctoral projects. He served as President of the Mexican Society of Operations Research (2020–2022) and has delivered plenary lectures at national and international conferences.

Keynote N°4

Operations Research Applied to Harvest Management: Methods, Models, and Challenges

Plenary Speaker: Marcela González Araya *(Universidad de Talca)*
Place: Campus Auditorium
Time: Wednesday, December 3rd, 11:30 – 12:30

The Chilean fruit sector is of great importance to the national economy and, in recent years, has shown remarkable growth thanks to the opening of new markets and the strengthening of highly demanded products such as cherries. However, this growth has also brought new challenges: coping with labor shortages, the effects of climate change, pressure on water resources, and international competition. These factors have made evident the need to modernize and optimize the management of the fruit supply chain.

Within this chain, the harvesting stage is particularly critical. It is a seasonal process in which productivity and quality can vary significantly. In addition, each fruit and variety ripens at different times, and many orchards combine multiple species, which complicates planning. For large agro-industrial companies, complexity increases even further when several geographically dispersed orchards must be coordinated simultaneously. Today, many decisions are still made primarily based on experience, which often leads to miscoordination and increased fruit losses.

This is where Operations Research methods and models play a fundamental role, allowing this traditional activity to be transformed into a much more efficient, flexible, and data-driven process. Through optimization tools, it is possible to plan resources, anticipate scenarios, respond to unforeseen changes, and improve the competitiveness of the sector.

In this talk, applications of Operations Research that have generated impact in Chilean fruit production will be presented. Attendees will learn about the main challenges of harvest planning, understand how mathematical models support complex decision-making, and discover research and development opportunities with high innovation potential. This is an invitation to apply Operations Research where it can make the greatest difference: in the transformation of strategic sectors for the country.

Marcela González Araya

Marcela González Araya is an Industrial Civil Engineer (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 1994), holds a Bachelor's degree in Engineering Sciences (Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993), a Master's degree in Production Engineering Sciences (Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997), and a Ph.D. in Production Engineering Sciences (Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003). She is a Full Professor in the Department of Industrial Engineering at the Faculty of Engineering of the University of Talca, where since April 2005 she has carried out research and teaching in operations research tools applied to the coordination of agri-food supply chains and to eco-efficiency assessment through the combined use of Data Envelopment Analysis and Life Cycle Assessment. She has published more than 85 papers in peer-reviewed international journals and conferences, accumulating over 2,200 citations. She has supervised numerous undergraduate, master's, and doctoral theses and has participated in more than 20 research projects with national and international funding. In March 2025, she became the first woman to serve as Dean of the Faculty of Engineering at the University of Talca for the 2025–2028 term, marking a milestone in female representation in STEM.

Accepted Contributions

Session N°1 – Track N°1

Stochastic and Robust Optimization

Chair: Avanzini, E. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
Place: G6-054
Time: 10:40 – 11:55

Un Enfoque de Programación Estocástica en dos Etapas para Optimizar las Decisiones de Compra de Vino Considerando Incertidumbre Climática

Time: 10:40 – 10:55
Authors:

- Toledo, A. *(Universidad Católica del Norte)*
- Monardes-Concha, C. *(Universidad Católica del Norte)*
- Avanzini, E. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Varas, M. *(Universidad del Desarrollo)*
- Basso, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Pezoa, R. *(Universidad Diego Portales)*

Risk-Averse Cooperation in Inventory Management: The SSD-Core in Multiple Newsvendors Games

Time: 11:00 – 11:15
Authors:

- Ryzák, D. *(Charles University)*
- Černý, M. *(Charles University)*

Stochastic Optimization-Based Firebreak Location Models for Wildfires Management

Time: 11:20 – 11:35
Authors:

- Medalla, M. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Dávila-Gálvez, S. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Quezada, F. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Investment Policies for Strategic Capacity Planning Assessment Based on Risk Profile: A Two-Stage Stochastic Approach

Time: 11:40 – 11:55
Authors:

- Avanzini, E. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Brunaud, B. *(Johnson and Johnson)*
- Yang, H. *(Johnson and Johnson)*

Un enfoque de programación estocástica en dos etapas para optimizar las decisiones de compra de vino considerando incertidumbre climática.

Alan Toledo
School of Engineering
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Coquimbo Region, Chile
alan.toledo@alumnos.ucn.cl

Carlos A. Monardes-Concha
School of Engineering
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Coquimbo Region, Chile
cmonardes@ucn.cl

Elbio L. Avanzini
Industrial and Systems Engineering Department
Pontificia Universidad Católica de Chile
Macul, Metropolitan Region, Chile
elavanzini@uc.cl

Mauricio Varas
Centro de Investigación en Sustentabilidad y Gestión Estratégica de Recursos, Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo
Las Condes, Metropolitan Region, Chile
mavaras@udd.cl

Franco Basso
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Valparaíso Region, Chile
Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería
Santiago, Metropolitan Region, Chile
franco.basso@pucv.cl

Raúl Pezoa
Department of Industrial Engineering
Universidad Diego Portales
Santiago, Metropolitan Region, Chile
raul.pezoa@udp.cl

***Abstract*—La planificación de la cadena de suministro del vino enfrenta varios desafíos tácticos, entre ellos la incertidumbre en el suministro de uva debido a las condiciones meteorológicas. Estudios anteriores se han centrado principalmente en eslabones aislados de la cadena de suministro, sin tener en cuenta el impacto de la incertidumbre en toda la cadena. Este artículo propone una novedosa formulación de programación estocástica en dos etapas para apoyar la toma de decisiones tácticas en la elaboración del vino, a diferencia de enfoques anteriores que han estudiado etapas aisladas de la cadena de suministro o han ignorado la incertidumbre climática, nuestra propuesta integra simultáneamente decisiones tácticas y operativas bajo incertidumbre, lo cual no se encuentra en la literatura actual. Debido a la carga computacional, se propone un procedimiento heurístico en dos pasos para abordar casos reales de este problema en tiempos de cómputo reducidos, condicionados por el límite de tiempo para la toma de decisiones en la práctica. El primer paso consiste en adquirir recursos y materias primas mediante la compra de uva a través de contratos a plazo, teniendo en cuenta las variaciones en la calidad de la uva resultantes de los patrones de lluvia. El segundo paso, por el contrario, consiste en la gestión operativa de los recursos obtenidos, incluida la asignación de la uva a los tanques de fermentación y su programación correspondiente. Se verifica que la solución calculada cumpla con la cuota de mercado requerida; de lo contrario, el modelo responde adquiriendo uvas adicionales en el mercado mediante contratos inmediatos. Evaluamos la eficacia de este modelo mediante simulaciones, lo que nos proporciona información valiosa sobre las compensaciones entre la asignación de recursos, los costos de producción y la capacidad de satisfacer la demanda. Por último, este enfoque ofrece una excelente flexibilidad en la gestión de la incertidumbre, proporcionando soluciones eficientes con recursos computacionales mínimos.**

***Index Terms*—Industria vitivinícola, Incertidumbre, Planificación de la producción, Enfoque en dos etapas, Cadena de suministro del vino.**

I. Introducción

La industria vitivinícola es un sector económico y cultural relevante, con una producción mundial de 237 millones de hectolitros en 2023, de los cuales un 41.9% fue destinado a exportaciones por más de 36 mil millones de euros. La creciente complejidad de su cadena de suministro, caracterizada por múltiples procesos, objetivos en conflicto e incertidumbre climática, exige herramientas de optimización para mejorar la toma de decisiones.

Bodegas pequeñas y medianas, sin activos propios, suelen subcontratar materia prima y capacidad de producción. En este contexto, la incertidumbre en calidad y volumen de uva, determinada en gran parte por la precipitación, condiciona decisiones anticipadas de compra y capacidad, así como ajustes operativos posteriores.

La literatura prioriza estudios por etapa, con escasa integración de decisiones multi-nivel bajo incertidumbre. Este

trabajo propone un modelo estocástico en dos etapas que optimiza políticas de compra a terceros, considerando producción, comercialización e incertidumbre climática. Además, se diseña una heurística de dos pasos que permite generar políticas contractuales eficientes y aplicables en contextos reales.

II. Revisión de la Literatura

La cadena de suministro vitivinícola incluye cosecha, producción, embotellado y distribución, etapas en las que la investigación operativa ha aportado modelos relevantes [1].

En cosecha, destacan modelos MILP y enfoques estocásticos para gestionar costos, mano de obra e incertidumbre climática [2]–[5]. El embotellado se ha estudiado mediante programación con tiempos de preparación dependientes de secuencia, estrategias de etiquetado diferido y esquemas colaborativos [6]–[10]. La producción ha recibido menor atención, centrada en asignación y transferencia en tanques bajo incertidumbre [11], [12]. En distribución, se han modelado asignaciones y transporte eficiente [13]–[15].

Si bien muchos trabajos abordan etapas de forma aislada, también existen enfoques integrados [16]–[18]. Sin embargo, la mayoría omite la incertidumbre, brecha que este trabajo enfrenta mediante un modelo estocástico en dos etapas para apoyar decisiones de compra bajo condiciones climáticas inciertas.

III. Descripción del problema

La cadena de suministro vitivinícola enfrenta desafíos operacionales marcados por la estacionalidad y la incertidumbre climática. Las etapas de cosecha, fermentación y manipulación del vino a granel son altamente interdependientes y sensibles a eventos como la lluvia, que afecta tanto el rendimiento como la calidad de la uva (medida en °Brix). Además, la planificación de la fermentación depende de la madurez de la uva y la disponibilidad de capacidad instalada.

Bodegas medianas y pequeñas suelen subcontratar la producción y el abastecimiento, lo que brinda flexibilidad pero también expone a riesgos de calidad, oferta y precio. Para mitigar estos riesgos, se utilizan contratos anticipados (forward) y contratos inmediatos (spot).

Este estudio se centra en una bodega argentina mediana que externaliza completamente la producción. Su operación depende de decisiones informadas sobre contratos, capacidades y asignación de recursos ante la incertidumbre climática, especialmente la lluvia, principal factor que impacta la viabilidad técnica y financiera.

Se propone un modelo de programación estocástica en dos etapas. En la primera, se toman decisiones anticipadas: compra de uvas anticipada y arriendo de capacidad de procesamiento. En la segunda, una vez revelado el escenario climático, se ajustan decisiones operativas: compras spot, programación de la fermentación y asignación del vino a granel, respetando capacidades y restricciones de formulación. Este enfoque permite equilibrar decisiones estratégicas y operativas bajo incertidumbre.

IV. Formulación Matemática

La formulación matemática del problema se estructura para describir el modelado de eventos de lluvia, su impacto en la calidad de la uva, la generación de escenarios y el modelo de programación estocástica.

A. Modelado de Eventos de Lluvia mediante Cadenas de Markov de Tiempo Discreto

Se asume que la probabilidad de precipitación en una zona depende del estado climático del día anterior. Todos los lotes en la misma zona geográfica son afectados simultáneamente. Esta dependencia temporal se captura mediante una cadena de Markov de dos estados ("lluvia" 1 y "seco" 0), con una matriz de probabilidad de transición. La lluvia en el día t en una zona aumenta la probabilidad de precipitación en esa zona y sus vecinas en el día $t + 1$.

B. Modelado del Impacto de la Lluvia en la Calidad de la Uva

La madurez de la uva, evaluada por grados Brix, es crucial para la calidad del vino. La lluvia precosecha puede diluir la concentración de azúcar, reduciendo los Brix, y en casos severos, puede causar daño físico o enfermedades fúngicas. Se extienden los enfoques existentes incorporando la velocidad de secado, el efecto acumulativo de lluvias consecutivas y escenarios extremos de daño irreversible. Los eventos de lluvia se categorizan en:

- Tipo I: Impacto insignificante en la calidad.
- Tipo II: Degradación de la calidad parcialmente reversible.
- Tipo III: Daño irreversible, uvas no aptas para procesamiento.

La calidad de la uva en el lote l en el día t se determina mediante la estimación de la evolución de la calidad durante la ventana de cosecha e incluye la curva de maduración ideal, efectos reversibles de lluvias Tipo II y efectos irreversibles de lluvias Tipo III (pérdida total de calidad).

C. Generación de Escenarios y formulación estocástica en dos etapas

La generación de escenarios se basa en el método de Monte Carlo. Para cada escenario, se genera una matriz de eventos de lluvia y se calcula la calidad de la uva de acuerdo a estos eventos. Los escenarios se clasifican por el valor potencial de los lotes (producto de producción total de uva, precio de compra y calidad máxima). Escenarios con más lluvia son menos favorables. Se selecciona un subconjunto de escenarios por percentiles predefinidos, asumiendo igual probabilidad.

El problema de compra de uva y producción de vino bajo incertidumbre climática se formula como un modelo de programación estocástica en dos etapas. Este marco, a diferencia de enfoques deterministas, incorpora la adaptabilidad a la variabilidad climática. En la primera etapa se toma decisiones anticipadas de compra de uva mediante contrato forward y arriendo de capacidad de fermentación, mientras que en la segunda etapa se toman decisiones correctivas de compras

de uva spot, programación de fermentación y formulación de productos.

D. Enfoque heurístico

Si bien existen algoritmos exactos para resolver problemas de programación estocástica de dos etapas, incluso con variables enteras, su aplicación directa resulta impracticable en instancias de gran escala debido a las restricciones de tiempo disponibles para la toma de decisiones en la industria.

Debido a la maldición de la dimensionalidad, se propone una heurística constructiva en dos pasos (Two-Step Method). El primer paso optimiza las decisiones tácticas usando valores esperados y una resolución temporal semanal; el segundo reoptimiza decisiones operativas en función de escenarios climáticos simulados, con una resolución diaria.

Si bien el término "maldición de la dimensionalidad" se asocia formalmente a modelos estocásticos multietapa, en este trabajo se utiliza en un sentido práctico para reflejar el rápido crecimiento del espacio de escenarios cuando se incrementa el horizonte temporal o el número de lotes de uva considerados. En este contexto, la heurística propuesta constituye una alternativa eficiente que permite obtener soluciones de alta calidad en tiempos de cómputo reducidos, garantizando la aplicabilidad del modelo en entornos reales de decisión.

V. Resultados Computacionales e Implicaciones Gerenciales

El método de dos pasos optimiza la eficiencia computacional, superando a los solucionadores comerciales al ofrecer soluciones de alta calidad en menor tiempo y con brechas de optimalidad significativamente reducidas. En el caso más complejo, TSM proporciona una solución válida y competitiva. Las soluciones obtenidas fueron validadas, confirmando su aplicabilidad práctica para estrategias de planificación robustas bajo incertidumbre climática.

El análisis del caso real muestra que, al aumentar los precios de venta, el modelo prioriza productos de mayor rentabilidad. Con precios decrecientes, se enfoca selectivamente en mercados premium, equilibrando el volumen con penalizaciones por demanda insatisfecha en mercados de menor valor. La flexibilidad en el almacenamiento pre-embotellado permite vinos de mezcla más económicos. El modelo prioriza mercados de alto valor, tolerando estratégicamente deficiencias en segmentos de bajo valor. Se comprobó que el uso de cinco escenarios climáticos es suficiente para decisiones consistentes en la primera etapa, lo que garantiza fiabilidad sin explosión combinatoria de escenarios, reforzando su aplicabilidad en la planificación con recursos computacionales limitados.

VI. Conclusiones

Este estudio aborda la planificación estacional de una cadena de suministro vitivinícola que subcontrata producción, considerando la incertidumbre en calidad y volumen de uva. Para ello se formuló un modelo estocástico en dos etapas: decisiones tácticas (contratos y capacidad) y operativas (compras spot, fermentación, embotellado).

A diferencia de trabajos previos, el modelo integra decisiones estratégicas y operativas bajo incertidumbre, aunque su complejidad limita la aplicación a casos reales. Para enfrentar este desafío, se propuso una heurística en dos fases que reduce tiempos de cálculo y mantiene soluciones factibles, logrando en pruebas un 48% menos de tiempo de resolución y una mejora promedio del 10% en la brecha de optimalidad.

Existen limitaciones, como la suposición de igual probabilidad en escenarios y la simplificación del modelado climático. Futuras investigaciones podrían incorporar distribuciones empíricas, modelos meteorológicos más realistas, enfoques híbridos o multi-etapa, así como explorar opciones reales e impactos aguas abajo para una comprensión más completa de la resiliencia de la cadena de suministro.

Referencias

[1] L. Moccia, "Operational research in the wine supply chain," INFOR: Information Systems and Operational Research, vol. 51, no. 2, pp. 53–63, 2013.

[2] J.-C. Ferrer, A. Mac Cawley, S. Maturana, S. Toloza, and J. Vera, "An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations," Int. J. of Production Economics, vol. 112, no. 2, pp. 985–999, 2008.

[3] C. Bohle, S. Maturana, and J. Vera, "A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling," European J. of Operational Research, vol. 200, no. 1, pp. 245–252, 2010.

[4] E. L. Avanzini, A. F. Mac Cawley, J. R. Vera, and S. Maturana, "Comparing an expected value with a multistage stochastic optimization approach...," Int. Trans. in Operational Research, vol. 30, no. 4, pp. 1843–1873, 2023.

[5] M. Varas et al., "A horizontal collaborative approach for planning the wine grape harvesting," Operational Research, vol. 22, no. 5, pp. 4965–4998, 2022.

[6] F. Basso and M. Varas, "A MIP formulation and a heuristic solution approach for the bottling scheduling problem in the wine industry," Computers & Industrial Engineering, vol. 105, pp. 136–145, 2017.

[7] M. Varas et al., "Assessing the benefits of labelling postponement in an export-focused winery," Int. J. of Production Research, vol. 56, no. 12, pp. 4132–4151, 2018.

[8] M. Varas et al., "Managing premium wines using an (s-1, s) inventory policy: a heuristic solution approach," Annals of Operations Research, vol. 280, pp. 351–376, 2019.

[9] F. Basso, M. Guajardo, and M. Varas, "Collaborative job scheduling in the wine bottling process," Omega, vol. 91, p. 102021, 2020.

[10] A. Mac Cawley et al., "Scheduling wine bottling operations with multiple lines and sequence-dependent set-up times," European J. of Operational Research, vol. 303, no. 2, pp. 819–839, 2022.

[11] E. Cakici et al., "Cellar Tank Piping Network Analysis at E. & J. Gallo Winery," Journal of Wine Research, vol. 17, no. 3, pp. 145–160, 2006.

[12] Z. Palmowski and A. Sidorowicz, "An application of dynamic programming to assign pressing tanks at wineries," European J. of Operational Research, vol. 287, no. 1, pp. 293–305, 2020.

[13] S. Cholette, "Using mixed-integer programming to match wineries and distributors," Interfaces, vol. 37, no. 3, pp. 231–239, 2007.

[14] S. Cholette and K. Venkat, "The energy and carbon intensity of wine distribution," J. of Cleaner Production, vol. 17, no. 16, pp. 1401–1413, 2009.

[15] F. Basso et al., "Optimizing the wine transportation process from bottling plants to ports," Operational Research, vol. 23, no. 2, p. 37, 2023.

[16] F. Szidarovszky and K. Szenteleki, "A multiobjective optimization model for wine production," Applied Mathematics and Computation, vol. 22, no. 2–3, pp. 255–275, 1987.

[17] M. Varsei and S. Polyakovskiy, "Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia," Omega, vol. 66, pp. 236–247, 2017.

[18] R. Fragoso and J. R. Figueira, "Sustainable supply chain network design: An application to the wine industry in Southern Portugal," J. of the Operational Research Society, vol. 72, no. 6, pp. 1236–1251, 2021.

Risk-Averse Cooperation in Inventory Management: The SSD-Core in Multiple Newsvendors Games

David Ryzák
Department of Applied Mathematics
Charles University
Prague, Czech Republic
david.ryzak99@gmail.com

Martin Černý
Department of Applied Mathematics
Charles University
Prague, Czech Republic
cerny@kam.mff.cuni.cz

***Abstract*—We study stochastic cooperative games motivated by the multiple newsvendors problem, where agents with uncertain and individually distributed demands cooperate on centralized ordering. To capture risk aversion without specifying utility functions, we introduce the *SSD-core*, a solution concept based on second-order stochastic dominance (SSD). In the case of uniformly distributed demands, we derive simple dominance conditions under which cooperation is stable for all risk-averse coalitions. Our results demonstrate how the SSD-core reflects realistic incentives for risk-averse newsvendors and provides a robust framework for cooperative decision-making under uncertainty.**

***Index Terms*—Cooperative games, risk aversion, stochastic dominance, core, uncertainty, robust allocation**

I. Introduction

Risk aversion plays a central role in cooperative decision-making under uncertainty. While classical models often rely on expected utility or risk measures that require precise specification of players' preferences, second-order stochastic dominance (SSD) offers a more general and robust way to model risk-averse behavior. SSD captures preferences shared by all risk-averse individuals without assuming exact utility functions or parameters, making it particularly suitable for cooperative games with stochastic payoffs.

In this work, we introduce the *SSD-core*, a new solution concept for cooperative games with stochastic characteristic functions. Unlike previous approaches that depend on specific utility-based formulations (e.g., using variance penalties or total orderings), the SSD-core ensures that allocations are acceptable to all risk-averse players under SSD. Our model assumes payoffs to be affine transformations of the grand coalition value, which—though less general—allows for clear interpretation and practical relevance.

We demonstrate the usefulness of the SSD-core in the context of the multiple newsvendors problem, a classical setting in inventory management involving uncertain demand. Unlike earlier studies that assume risk neutrality, we focus on centralized ordering with pooled inventories among risk-averse players. This setup allows us to characterize stable, fair allocations without requiring precise knowledge of individual risk attitudes.

II. Model and SSD-core

We consider cooperative games with uncertain payoffs, where the value of each coalition is modeled as a random variable. Formally, a *stochastic TU-game* is a pair (N, v), where $N = \{1, \dots, n\}$ is a set of players and

$$v\colon 2^N \to \mathcal{L}$$

assigns to each coalition $S \subseteq N$ a real-valued random variable $v(S) \in \mathcal{L}$, defined on a common probability space.

We assume players agree to divide the realized value of the grand coalition proportionally, up to fixed transfer payments. Thus, we consider stochastic payoffs of the form

$$x_i = d_i + r_i \cdot (v(N) - \mathbb{E}[v(N)]), \quad i \in N,$$

where $d_i \in \mathbb{R}$ and $r_i \geq 0$. The vector $x = (x_i)_{i \in N}$ is *efficient* if $\sum_{i \in N} d_i = \mathbb{E}[v(N)]$ and $\sum_{i \in N} r_i = 1$.

We capture players' risk-averse preferences using second-order stochastic dominance (SSD). Given two random variables X, Y, we write $X \succeq_{SSD} Y$ if

$$\mathbb{E}[u(X)] \geq \mathbb{E}[u(Y)]$$

for all concave utility functions $u\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$. This leads to the central solution concept of this work:

Definition 1 (SSD-core)**.** *Let (N, v) be a stochastic TU-game. The* SSD-core*, denoted $\mathbf{DC}(v)$, is the set of efficient stochastic payoffs x such that*

$$x(S) \succeq_{SSD} v(S) \quad \textit{for all } S \subseteq N,$$

where $x(S) = \sum_{i \in S} x_i$ and $x(N) \sim v(N)$.

To analyze the SSD-core, we consider the associated *mean game* (N, μ) with $\mu(S) = \mathbb{E}[v(S)]$. For uniform distributions $v(S) \sim U[a_S, b_S]$, we define the *lower bound game* (N, a) with $a(S) = a_S$, and for normal distributions, the *deviation game* $(N, \tilde{\sigma})$ with $\tilde{\sigma}(S) = \sigma_S / \sigma_N$.

III. Analysis of the SSD-core

We analyze conditions under which the SSD-core $\mathbf{DC}(v)$ is nonempty. In doing so, we rely on the *core*, resp. the *cost-core* of the deterministic TU-games (N, μ), (N, a) and $(N, \tilde{\sigma})$.

Theorem 1 (SSD-core under normal distribution)**.** *Let* $v(S) \sim N(\mu_S, \sigma_S^2)$ *for all* $S \subseteq N$*. Then*

$$\boldsymbol{DC}(v) \neq \emptyset \iff \text{core}(\mu) \neq \emptyset \text{ and } \text{core}_{cost}(\tilde{\sigma}) \neq \emptyset.$$

Theorem 2 (SSD-core under uniform distribution)**.** *Let* $v(S) \sim U[a_S, b_S]$ *for all* $S \subseteq N$*. Then*

$$\boldsymbol{DC} \neq \emptyset \Rightarrow \text{core}(\mu) \neq \emptyset \text{ and } \text{core}(a) \neq \emptyset,$$

but the converse holds only under an additional condition:

$$\text{if } (N, a) \text{ is convex and } \text{core}(\mu) \neq \emptyset \Rightarrow \boldsymbol{DC} \neq \emptyset.$$

Theorem 1 gives a full characterization for the normal case: the SSD-core is nonempty if and only if both the mean game and the deviation game have nonempty cores. In contrast, Theorem 2 shows that for uniform distributions, the same implication does not reverse in general. Instead, convexity of the lower bound game is required in addition to the mean game's balancedness. This highlights the role of geometric properties of classical games in the structure of the SSD-core.

IV. Application: Multiple Risk-Averse Newsvendors

We now apply the SSD-core framework to the multiple newsvendors problem. We consider a single-period setting with a centralized order and pooled inventories, where players may satisfy each other's demand. Unlike prior approaches that optimize expected profit, we retain the stocharstic structure and model risk aversion using SSD.

A stochastic multiple newsvendors problem is defined by $((Y_S)_{S\subseteq N}, c, p)$, where Y_S is the random demand of coalition S, and $c < p$ are unit purchase and selling prices. Coalition S's profit from ordering q_S units is

$$v(S, q_S) = p \cdot \min(Y_S, q_S) - c \cdot q_S.$$

We define the characteristic function as $v(S) := v(S, q_S^*)$, where $q_S^* = \arg\max_q \mathbb{E}[v(S, q)]$, ensuring optimal expected ordering.

We assume that each $Y_S \sim U[a_S, b_S]$, i.e., demand follows a uniform distribution. Under optimal ordering, the induced profit distribution $v(S)$ becomes a hybrid of a continuous and discrete distribution, with a flat upper tail. We refer to this form as an α*-cut uniform distribution*, defined as follows:

Definition 2 (α-cut uniform distribution)**.** *Let* $\alpha \in (0, 1)$ *and* $a < b$*. A random variable* $Z \sim U_\alpha[a, b]$ *has the cumulative distribution function*

$$F_Z(x) = \begin{cases} 0 & x < a, \\ \alpha \cdot \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b, \\ 1 & x \geq b. \end{cases}$$

This distribution arises when the optimal order quantity truncates the upper part of the original uniform demand distribution. Figure 1 illustrates an example of such a distribution with different values of α.

Using SSD conditions derived for these distributions, we obtain the following result for allocations of the form $x_i = r_i \cdot v(N)$, where each player receives a fixed share of the realized profit without transfer payments. This is a special case of the general (d, r)-type allocations.

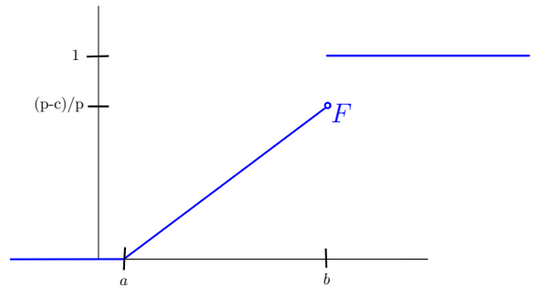


Fig. 1. α-cut uniform distributions with varying α.

Theorem 3. *Let* (N, v) *be a stochastic multiple newsvendors game with* $Y_S \sim U[a_S, b_S]$*. Then the SSD-core* $\boldsymbol{DC}(v)$ *is nonempty (under allocations of type* r*) if and only if for all* $S \subseteq N$*:*

$$r(S)(a_N p - c(b_N - a_N)) \geq a_S p - c(b_S - a_S),$$
$$r(S)(a_N(p + c) + b_N(p - c)) \geq a_S(p + c) + b_S(p - c).$$

The first condition ensures that the coalition's share in the grand coalition provides better protection against demand fluctuations than acting independently. The second compares the *market quality*, a combination of expected net income and overstock risk. Together, they describe when cooperation is appealing to all risk-averse players under SSD.

V. Conclusion

We introduced the SSD-core, a solution concept for stochastic cooperative games that models risk aversion via second-order stochastic dominance. This approach allows for robust cooperative decisions without specifying players' utility functions, making it well-suited for uncertain environments.

Our main application focused on the multiple newsvendors problem, where agents with individual demand distributions jointly determine a centralized order. In this setting, we derived interpretable conditions under which cooperation is stable for all risk-averse coalitions. By linking the SSD-core to the cores of associated deterministic games—based on expected values and demand bounds—we obtained tractable criteria for its nonemptiness under normal and uniform distributions.

The SSD-core captures meaningful incentives in cooperative decisions under uncertainty, though limitations remain, such as ignoring covariance across coalitions and relying on the partial ordering of SSD. Future work could extend the model to other demand distributions, and discrete order quantities.

References

[1] A. Charnes and W. W. Cooper, "Prior determination of stochastic payoffs in games," *Management Science*, vol. 19, no. 8, pp. 936–953, 1973.
[2] J. Suijs, "Cooperative games with stochastic payoffs," *European Journal of Operational Research*, vol. 113, no. 1, pp. 193–205, 1999.

[3] L. M. Fernández, "Cores of games with stochastic dominance constraints," *Mathematical Methods of Operations Research*, vol. 56, no. 2, pp. 267–285, 2002.
[4] L. Sun and Z. Li, "Optimization-based solutions in stochastic cooperative games," *Operations Research Letters*, vol. 50, pp. 101–107, 2022.
[5] O. O. Özener, N. Erkip, and M. S. Daskin, "Convexity of the multiple newsvendor problem," *Operations Research*, vol. 59, no. 3, pp. 762–773, 2011.
[6] Y. Yang, X. Li, and X. Xu, "Multilocation inventory games: Four variants of cooperation," *Omega*, vol. 100, p. 102276, 2021.

Stochastic Optimization-Based Firebreak Location Models for Wildfires Management

1st Matías Medalla
Industrial Engineering Department
University of Santiago of Chile (USACH)
Santiago, Chile
matias.medalla@usach.cl

2nd Sebastián Dávila
Industrial Engineering Department
University of Santiago of Chile (USACH)
Santiago, Chile
sebastian.davila@usach.cl

3rd Franco Quezada
Industrial Engineering Department
University of Santiago of Chile (USACH)
Santiago, Chile
franco.quezada@usach.cl

***Index Terms*—Stochastic Programming, Wildfires, Scenario Reduction**

I. Abstract

Wildfires pose increasing ecological and socioeconomic challenges worldwide, exacerbated by climate change and human pressures. Among preventive measures, the strategic placement of firebreaks has become a critical tool to contain fire propagation and protect high-value ecosystems. This paper introduces a novel two-stage stochastic optimization model for the Firebreak Placement Problem (FPP), designed to minimize expected wildfire impact under uncertainty in ignition and spread dynamics. The model employs the Downstream Protection Value (DPV) metric to quantify the influence of each treated cell on overall fire propagation, thus promoting configurations that transform uncontrolled fires into linear, more manageable patterns. Fire behavior is simulated through the Cell2Fire framework, enabling realistic spatial-temporal representations of wildfire dynamics across diverse landscapes. Due to the computational complexity arising from numerous fire scenarios, a scenario reduction methodology based on the Frobenius distance is proposed, selecting representative scenarios through a p-median formulation. Two formulations of the FPP are evaluated: a bilinear version (FPP-BL) and a linearized counterpart (FPP-L). Experimental results on a real Canadian landscape (Sub20, Alberta region) demonstrate that FPP-BL achieves tighter continuous relaxations and smaller optimality gaps. Moreover, the representative scenario approach significantly reduces computational time without compromising solution quality, providing an effective mechanism for large-scale problems. This research contributes to the field of wildfire prevention by integrating stochastic optimization, landscape simulation, and scenario management, offering a practical decision-support framework for sustainable forest protection.

Investment policies for strategic capacity planning assessment based on risk profile: a two-stage stochastic approach

Elbio L. Avanzini
Medtech Data Science
Johnson and Johnson
Santiago, Chile
eavanzin@its.jnj.com

Braulio Brunaud
Medtech Data Science
Johnson and Johnson
New Jersey, United States
bbrunau1@its.jnj.com

Haokun Yang
Medtech Data Science
Johnson and Johnson
California, United States
hyang32@its.jnj.com

***Abstract*—Strategic capacity planning is crucial for the success of companies, as it prepares them for future challenges. Investment and demand attainment are contingent on accurately forecasting future demand; however, once demand is realized, a company's ability to respond is often limited. This challenge is particularly pronounced in industries where innovation is essential, such as the medical device sector.**

In this study, we investigate the supply chain strategic capacity planning of medical devices industry by employing various configurations of two-stage stochastic models under different uncertainty conditions. Our aim is to demonstrate how these models facilitate the formulation of first-stage policies that foster effective risk control decisions, rather than merely maximizing expected values in the face of variability. We compare the stochastic approach results with the ones from deterministic models that consider different simulated scenarios of demand. Beside MILP and stochastic optimization, we add a DEA optimization to determine the dominants investment policies.

The results indicate that two-stage stochastic optimization provides superior alternative policies compared to conventional approaches, underscoring the significance of considering the type of uncertainty when determining first-stage periods and recourse variables.

***Index Terms*—strategic capacity planning, stochastic optimization, two-stage, risk evaluation**

I. Introduction

Strategic capacity planning is a critical activity for the success of companies, as it prepares them for future challenges, although it remains a complex process. In high-innovation industries that utilize costly technology, the cannibalization between new and mature products renders effective capacity and inventory management essential [1]. As highlighted in [2], marketing and financial variables must be considered in this planning process due to their significant impact on business performance.

The number of factors to account for in a long-term planning cycle is substantial, and the quality of available information is often suboptimal; therefore, variability must be addressed. Solutions should be tailored to specific manufacturing environments due to their inherent sensitivities. Modeling uncertainty is fundamental, as the confidence and complexity of results are contingent upon it.

Previous applications of operations research in this domain include optimization and simulation methods. For instance, [3] presents a non-convex model for capacity actions and production order selection within the semiconductor industry, solved using genetic algorithms. In a different approach, [4] develops an uncertain multi-objective decision framework specifically for the same sector. Additionally, uncertainty has been addressed in earlier studies employing methods such as scenario-based stochastic programming for capacity and demand [5] and yield optimization through Markov decision processes [6], among other methodologies.

In this study, we address a strategic capacity planning problem for a medical devices manufacturer operating under uncertainty. Traditional scenario-based planning provides transparency regarding the impact of investment policies on the nominal or most probable demand forecast. However, the planning horizon involves uncertainty due to variations in product mix and quantities across periods. A scenario analysis approach involves selecting relevant scenarios and evaluating the optimal investment policies for each. Additionally, investment policies can be assessed across different demand scenarios to determine the expected value of the deterministic solutions.

We propose to extend this approach further. Instead of relying solely on individual deterministic scenarios, we introduce a two-stage stochastic optimization model that explicitly accounts for future uncertainties. The goal is to derive an investment policy with improved performance compared to scenario-based methods. The model integrates investment and production decisions within various temporal structures to analyze their influence on outcomes. The initial periods will encompass common decisions that are invariant to demand patterns, allowing subsequent policy adjustments in later stages based on realized demands.

Our methodology generates policies for different demand scenarios sharing initial decisions, with subsequent adaptations tailored to specific demands. To assess the solution quality, we develop two-stage models where the second-stage solutions correspond to demand-specific production recommendations.

This approach offers a more realistic representation than simply optimizing the expected value of deterministic solutions.

Finally, we incorporate new risk-based metrics to evaluate decision impacts from multiple perspectives. These metrics are employed within a Data Envelopment Analysis framework to compare different investment policies and identify benchmark strategies.

Given that demand forecasts are inherently uncertain, we simulate their behavior using an innovation diffusion method (Bass model) combined with Monte Carlo simulation; subsequently, the number of new scenarios is reduced to facilitate optimization.

Our approach begins with small-scale case studies to comprehend the behavior within a controlled environment, followed by an examination of initial findings in real-world scenarios.

II. Brief Problem Statement

This study addresses the strategic capacity planning in the medical device industry. The supply chain is distributed across multiple locations, with each supplier implementing different policies regarding the production lines utilized for manufacturing medical products. A comprehensive map of production qualifications is available, along with detailed information on Work Center performance and maintenance programs.

An expected demand forecast is provided, allowing for the propagation of requirements based on production lead times and the bill of materials. Similarly, inventory policies are defined. The planning horizon extends over five years, with decisions made on a quarterly basis. The objective function is to maximize the net present value of the profit while maintaining low inventory investments (minimizing target's deviation), and efficiently managing new capacity expansion initiatives (business policies). In addition to production costs, penalties are imposed for deviations from target inventory levels and for under-utilization of Work Centers.

III. Algorithm

In Figure 1, we present a high-level overview of the methodology employed in this study. After sampling scenarios based on their demand representation, we optimize each scenario individually. In the two-stage approach, we rescale the probabilities; rather than generating multiple policies, we derive a singular policy for the first stage and specific policies for the second stage.

The policy evaluation method involves testing the capacity investment policy against each of the original simulated demands. We optimize each scenario once more, fixing the capacity investment policy as the first-stage decision, while the production decisions serve as the second-stage decisions. Based on the results, we construct a set of performance indicators that reflect both economic and operational perspectives. Given the multiple scenarios, we develop distributions for each indicator and subsequently apply a risk measure known as expected shortfall.

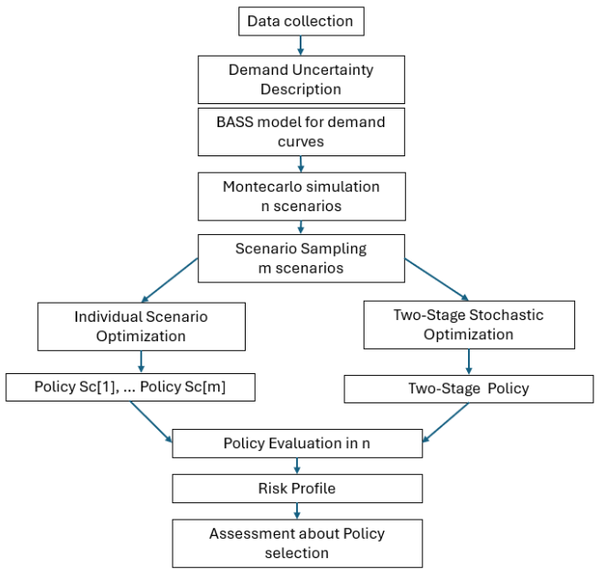


Fig. 1. Evaluation flowchart

Once we have built the risk profiles for the different investment policies and performance indicators, we implement a data envelopment analysis optimization problem using the policies to establish benchmarks and scoring. The final output of this process is the recommendation of one or more policies that are considered dominant relative to the others, based on their expected value and risk profile.

It is important to note that, although risk optimization models can be formulated as alternatives to the risk-neutral two-stage stochastic model, these models are generally more transparent and easier to communicate to managers. In practice, the choice of model often depends more on the audience and their understanding rather than solely on the technical advantages of the tool.

Stochastic Models

The stochastic models follow the two stage approach. The general formulation is:

$$\begin{aligned} \min_{x} \quad & c^T x + \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega d_\omega^T y_\omega \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & B_\omega x + D y_\omega = d_\omega \quad \forall \omega \in 1, ..., \Omega \\ & x, y_\omega \geq 0 \quad \forall \omega \in 1, ..., \Omega \end{aligned} \tag{1}$$

The first stage decision variables are described by x, and the associated costs vector c. The second-stage cost is represented by $\sum_{\omega \in \Omega} p_\omega d_\omega^T y_\omega$, depends on the realization of the random vector ξ. For each scenario ω there is a sequence of uncertainty realization, represented by this vector. Decisions y are made

with perfect information, after the realization ξ, where d_ω is the cost vector for these decisions in this scenario.

We present two versions of this approach:

1) Model A: Capacity Investment and Production decisions are the same across all scenarios in the first stage for every period.
2) Model B: Capacity Investment is a unique policy for all scenarios in the first stage throughout all periods. The production decisions are according to the specific demands of the scenarios, a kind of recourse action in the first stage.

IV. Results and Discussion

After conducting multiple experiments, preliminary results indicate that the investment policies derived from the two-stage stochastic models exhibit a superior risk profile compared to those generated by highly conservative policies. However, the size of the first stage is critical due to investment lead times. The uncertainty distribution cone also plays a significant role, particularly when exploring the scenario space to reduce the time required for multiple optimizations.

Furthermore, we found it necessary to incorporate additional methodologies to provide better insights into the relative importance of the scenarios, given the multidimensional nature of the risk analysis. This research is ongoing.

References

[1] Wu, S. D., Erkoc, M., & Karabuk, S. (2005). Managing capacity in the high-tech industry: A review of literature. The engineering economist, 50(2), 125-158.

[2] Lusa, A., Martinez-Costa, C., & Mas-Machuca, M. (2012). An integral planning model that includes production, selling price, cash flow management and flexible capacity. International Journal of Production Research, 50(6), 1568-1581.

[3] Wang, K. J., Wang, S. M., & Yang, S. J. (2007). A resource portfolio model for equipment investment and allocation of semiconductor testing industry. European Journal of Operational Research, 179(2), 390-403.

[4] Chien, C. F., Dou, R., & Fu, W. (2018). Strategic capacity planning for smart production: Decision modeling under demand uncertainty. Applied Soft Computing, 68, 900-909.

[5] Geng, N., Jiang, Z., & Chen, F. (2009). Stochastic programming based capacity planning for semiconductor wafer fab with uncertain demand and capacity. European Journal of Operational Research, 198(3), 899-908.

[6] Wu, C. H., & Chuang, Y. T. (2010). An innovative approach for strategic capacity portfolio planning under uncertainties. European Journal of Operational Research, 207(2), 1002-1013.

Session N°1 – Track N°2

Operations Research Applications

Chair: Vásquez, Ó. *(Universidad de Santiago de Chile)*
Place: G6-055
Time: 10:40 – 11:55

A Hybrid Produce-and-Choose Method for the Composite Retrieval Problem

Time: 10:40 – 10:55
Authors:

- Moyano, M. *(Universidad Católica del Norte)*
- Olivares-Alvarez, L. *(Universidad Católica del Norte)*
- Ojeda-Ortega, N. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Cabrera-Guerrero, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Revisión Sistemática de Enfoques Híbridos para la Gestión y la Sostenibilidad: Dinámica de Sistemas y Optimización

Time: 11:00 – 11:15
Authors:

- Cárcamo-Vallejos, N. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Espinoza-Pérez, A. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Uncertainty in Dynamic Data Envelopment Analysis Model with Optimal Control Principles

Time: 11:20 – 11:35
Author: Alves-Junior, P. *(Universidad Católica del Norte)*

Aprendizaje, Secuenciación y Decisiones Irreversibles: El caso de la Jubilación en Chile

Time: 11:40 – 11:55
Authors:

- Utreras-Cifuentes, C. *(Universidad del Desarrollo)*
- Laroze, D. *(Universidad del Desarrollo)*
- Vásquez, Ó. *(Universidad de Santiago de Chile)*

A Hybrid Produce-and-Choose Method for the Composite Retrieval Problem

1st Mauricio Moyano
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
mauricio.moyano@pucv.cl

2nd Luis Olivares-Alvarez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
luis.olivares@ce.ucn.cl

3rd Nicolle Ojeda-Ortega
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
nicolle.ojeda@pucv.cl

4th Guillermo Cabrera-Guerrero
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
guillermo.cabrera@pucv.cl

***Abstract*—In information retrieval, traditional search strategies typically consider only one attribute of the elements to build a ranking list of results, which depends exclusively on the selected attribute. However, often one needs to rethink the original query to accomplish the right solution, as these search strategies do not consider the existing relations among all the other attributes of the elements. As a response to this behaviour, Composite Retrieval of Diverse and Complementary Bundles has been proposed. This problem aims to construct bundles of items that are internally coherent (high similarity) and collectively diverse. Traditional produce-and-choose methods use clustering to generate bundles and heuristics to select the best subset. This work introduces a hybrid approach that replaces the heuristic phase with integer programming, improving solution quality and constraint handling.**

***Index Terms*—Composite Retrieval, Produce-and-choose, Integer programming, Hybrid Heuristic.**

I. Introduction

The Composite Retrieval Problem (CRP) arises when a set of items must be grouped into diverse and complementary bundles and then selected as a subset that maximises intra-group similarity and inter-group diversity. This problem has applications in various fields, such as information retrieval and recommendation systems.

In (1) and (2), the authors propose solving the CRP using an algorithm called C-HAC (and a proposed variant of it), which relies on a two-phase strategy known as produce and choose. Additionally, in their work, they proposed solving the CRP using an integer programming (IP) model. While the IP formulation is reported to converge after very long computational times, the C-HAC algorithm tends to favour one of the objectives over the other. The C-HAC algorithm still obtains very good results, though.

The first phase focuses on generating candidate bundles using constrained hierarchical agglomerative clustering (C-HAC) and its variants. The C-HAC algorithm starts with individual items as single-element bundles and iteratively merges them based on a scoring function that considers both similarity and diversity criteria. A variation of this approach, C-HACII, incorporates inter-bundle diversity more explicitly in the merging process by adjusting the score function to account for inter-bundle relations.

Based on this, we propose introducing a hybrid produce-and-choose method for the CRP, combining the C-HAC algorithm for the produce phase with an IP method for the choose phase. This hybrid approach leverages the efficiency of clustering algorithms to generate candidate bundles and the precision of mathematical programming to select the optimal subset.

Identify applicable funding agency here. If none, delete this.

II. Composite Retrieval Problem Formulation

In (1; 2), the CRP is formally defined as follows: given a set of items I, a similarity function $s(u, v)$ for each pair $u, v \in I$, a complementarity property α, a cost function $f : I \to \mathbb{R}^+$, a budget β, and a number of bundles k, we need to find a set of valid bundles $S = \{S_1 \dots S_k\}$ such that maximizes (1), where γ is a user-defined scaling parameter. Mathematically, we write the problem as

$$w(S,\gamma) = \gamma \sum_{i=1}^{k} \sum_{u,v \in S_i} s(u,v) + (1-\gamma) \sum_{1 \le i < j \le k} \left(1 - \max_{\substack{u \in S_i \\ v \in S_j}} s(u,v)\right) \quad (1)$$

Each bundle $S_i \in S$ is valid if and only if it satisfies the rules:

- **Complementarity:** $\forall u, v \in S_i, u.\alpha \neq v.\alpha$
- **Budget:** $\forall S_i \in S, \sum_{u \in S_i} f(u) \le \beta$

The equation (1) consists of a weighted combination of two components. The first component measures cohesion within each bundle (intra-bundle cohesion). The second one measures the distance (diversity) between them (inter-bundle). Usually, these targets (cohesive bundles and diverse bundles) are opposed and users might not be equally interested on both objectives: some users would prefer cohesive bundles over diverse ones or vice-versa. Thus, the parameter γ allows the user to define the desired balance between intra- and inter-solution components. Then, if bundles cohesion is preferred over diversity, the value of γ must be closer to one. The value of γ must be closer to zero, otherwise.

As mentioned before, one feature of the CRP problem is that we consider items' attributes within our search. Then, we aim to produce bundles such that their items offer different values at each attribute, improving the complementarity of such a bundle. The complementarity constraint addresses this problem, ensuring that there are no two items within the same bundle with the same attribute value, α. For our instances based on the Spotify dataset, the property α corresponds to the *Bands* (e.g., AC/DC, Asian Kung-Fu Generation, BAND-MAID, Queen, etc.). Thus, the complementarity constraint allows us to avoid that two songs sharing the same *Band* are included within the same bundle.

The CRP problem can also be modelled as an IP, which is used to obtain the optimal solution (2). This approach is prohibitive in practice because it requires a lot of running time. For the sake of completeness, we include the IP model for the CRP problem. Let us consider the following variables:

$$x_{uj} = \begin{cases} 1, & \text{if } u \in S_j, \quad u \in I, j = 1, ..., k \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$y_{uvj} = \begin{cases} 1, & \text{if } u \in S_j, \\ & v \in S_j \quad u, v \in I, u < v \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \max_{u \in S_i, v \in S_j} s(u, v) \quad i, j = 1, \ldots, k \quad i < j$$

Using the definitions above, the objective function of our problem may be written as:

$$\gamma \sum_{j=1}^{k} \sum_{\substack{u,v \in I \\ u<v}} s(u,v) y_{uvj} - (1-\gamma) \times \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=i+1}^{k} z_{ij} + (1-\gamma) \frac{k(k-1)}{2}$$

Then, the problem can be formulated as maximising this function subject to:

$$\sum_{u \in I} c_u x_{uj} \leq \beta \quad j = 1, \ldots, k, \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{u \in I \\ u.\alpha = a}} x_{uj} \leq 1 \quad j = 1, \ldots, k, \quad \forall a \text{ possible value of } \alpha, \quad (3)$$

$$y_{uvj} \leq \frac{x_{uj} + x_{vj}}{2} \quad j = 1, \ldots, k, \qquad u, v \in I \quad (4)$$

$$z_{ij} \geq s(u,v)(x_{ui} + x_{vj} - 1), \quad 1 \leq i < j \leq k \quad u, v \in I \quad (5)$$

$$x_{uj} \in \{0, 1\}, \quad y_{uvj} \in \{0, 1\} \quad 0 \leq z(jj') \leq 1.$$

Constraints (2) assert that the budget does not exceed the threshold for each bundle. Constraints (3) guarantee complementarity (two items with the same value for property a must not be assigned to the same bundle). Constraints (4) ensure that y_{uvj} is equal to 0 if items u and v are not in the same bundle j. Finally, constraints (5) give to z_{ij} the maximum similarity between items in bundles i and j.

III. Hybrid Produce-and-Choose Method

As mentioned in the previous section, over the last few years, an increasing interest in solving the CRP has been observed in the literature. Despite this, only a few algorithms have been proposed thus far. Among them, the most successful algorithms are those that use the Produce and Choose approach.

These algorithms use a general framework that consists of two-phases. During the first phase, the algorithm produces a set of valid bundles. Then, during the second phase, it seeks the best combination of k bundles among those made in the first phase, such that they maximise the objective function. For the phase I (bundles 'production'), clustering algorithms have been shown to perform particularly well (2). One of the clustering algorithms that has been successfully applied to the CRP is the constrained hierarchical agglomerative clustering (C-HAC) and a variation of it called Intra-Inter Constrained hierarchical agglomerative clustering (C-HAC$_{II}$) (3). As is mentioned in the work on (2). The problem can be approached by solving two subproblems: (1) Produce bundles and (2) Choose bundles.

A. Phase 1: Bundle Generation

The C-HAC algorithm starts with a number of clusters equal to the number of items; that is, we have n element bundles, where n is the total number of items. Then, the algorithm evaluates every possible pair of bundles from the previous iteration that meets both the budget and the complementarity constraints, by using a score function. The score function is the sum of the similarities of all the items of the candidate pair. The score for the valid cluster $C = C_i \cup C_j$ is calculated as follows:

$$\sum_{u,v \in C} s(u,v) \quad (6)$$

Once all the candidate pairs have been evaluated, the one that maximises the score function is selected. This pair is then merged and added to the set of clusters for the next iteration. The algorithm terminates when there are no feasible candidate pairs or a stopping condition is met (e.g., the number of clusters generated).

One weakness of this criterion is that it only considers intra-bundle similarity, which leads to a solution that tends to be poor in terms of diversity. To address this problem, the score function is modified in the C-HAC$_{II}$ algorithm so that the inter-bundle information is also considered in the score function.

Let C_i y C_j be two feasible bundles such that

$$A(C_i, C_j) = \sum_{u \in C_i, v \in C_j} s(u, v), \quad (7)$$

$$E(C_i, C_j) = \max_{u \in C_i, v \in C_j} s(u, v) \quad \text{and}$$

$$\text{Intra-Inter}(C_i, C_j) = \gamma(C_i, C_j) + t(1 - \gamma)E(C_i, C_j) \quad (8)$$

Where A is the intra-bundle similarity increase if clusters C_i and C_j are merged, and E gives an idea of the similarity between these two clusters, thus favouring the union of clusters with high similarity and, therefore, the dispersion in the final clustering (inter-bundle value). Since the value of E is negligible with respect to the value of A, the t factor tries to balance the two terms of this sum.

Once the first phase is over, i.e. a set of feasible bundles has been generated. The generated bundles are stored as candidate solutions for the second phase.

B. Phase 2: Choose bundles

In the second phase, we need to choose a feasible subset of k-bundles that maximises the objective function of the CRP. Although almost any heuristic method can be used at this phase to obtain a high-quality set of k-bundles, simpler algorithms are preferred in the literature (2). In this work, we propose to solve the next IP model that has the next objective function is to maximise:

$$\text{Maximize} \quad \gamma \sum_{i=0}^{N-1} \text{intra}_i x_i + (1 - \gamma) \sum_{i=0}^{N-2} \sum_{j=i+1}^{N-1} \text{inter}_{ij} y_{ij},$$

where intra_i represents the intra-bundle similarity of package p_i and inter_{ij} represents the inter-bundle diversity between packages p_i and p_j. The parameter γ controls the trade-off between these objectives.

The problem is subject to the following constraints:

1) **Bundle Selection Constraint**: Exactly K packages must be selected:
$$\sum_{i=0}^{N-1} x_i = K.$$
2) **Consistency Constraint for y_{ij}**:
$$2y_{ij} \leq x_i + x_j, \quad \forall i, j \text{ where } i < j.$$
3) **Binary Constraints**: The decision variables x_i and y_{ij} are binary:
$$x_i, y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j.$$

This mathematical model provides the foundation for the hybrid approach, which combines clustering methods with local search techniques to optimise the selection of bundles.

IV. Conclusions and Future Work

This work presents a hybrid produce-and-choose method for solving the Composite Retrieval Problem (CRP), which combines hierarchical clustering for bundle generation with integer programming for bundle selection. Although no computational experiments have been included in this extended abstract, the hybrid methodology provides a solid foundation for further analysis and empirical validation. In future work, we plan to implement the full pipeline using real-world datasets, such as an instance derived from the Spotify Million Playlist Dataset, and compare performance against traditional heuristics and metaheuristics reported in the literature.

References

[1] S. Amer-Yahia, F. Bonchi, C. Castillo, E. Feuerstein, I. Méndez-Díaz, and P. Zabala, "Complexity and algorithms for composite retrieval," in *Proceedings of the 22Nd International Conference on World Wide Web*, ser. WWW '13 Companion. New York, NY, USA: ACM, 2013, pp. 79–80. [Online]. Available: http://doi.acm.org/10.1145/2487788.2487822

[2] S. Amer-Yahia, F. Bonchi, C. Castillo, E. Feuerstein, I. Mendez-Diaz, and P. Zabala, "Composite retrieval of diverse and complementary bundles," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 26, no. 11, pp. 2662–2675, 2014.

[3] E. Feuerstein, J. A. Knebel, I. Méndez-Díaz, A. Stein, and P. Zabala, "New algorithms for composite retrieval," in *XLII Latin American Computing Conference, CLEI 2016, Valparaíso, Chile, October 10-14, 2016*, 2016, pp. 1–9. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/CLEI.2016.7833376

Revisión sistemática de enfoques híbridos para la gestión y la sostenibilidad: Dinámica de sistemas y Optimización

Nicolás Cárcamo Vallejos
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
nicolas.carcamo.v@usach.cl

Andrea Espinoza Pérez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
andrea.espinozap@usach.cl

***Resumen*—La gestión de residuos plásticos es uno de los desafíos ambientales más importantes en la actualidad, especialmente en países como Chile, donde la implementación de la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP) ha impulsado a las empresas a asumir la responsabilidad de la gestión de los residuos derivados de sus productos. En este contexto, los enfoques híbridos que combinan dinámica de sistemas y optimización ofrecen herramientas valiosas para comprender el comportamiento de sistemas complejos y mejorar la toma de decisiones tanto en políticas públicas como en las gestiones aplicadas a distintas industrias. Esta revisión sistemática, que abarca 376 estudios, revela que estos enfoques híbridos son especialmente útiles cuando se busca entender las dinámicas subyacentes de los sistemas de gestión de residuos y optimizar su rendimiento. Sin embargo, se destaca que los residuos plásticos, como las botellas PET, han sido escasamente estudiados mediante estas metodologías, especialmente en el contexto de América Latina. Además, existe una importante brecha técnica relacionada con la dificultad para integrar de manera efectiva las herramientas de dinámica de sistemas y optimización. Ante este vacío, este trabajo propone una base conceptual para futuras investigaciones que desarrollen modelos integrados, específicamente orientados hacia la sostenibilidad y adaptados a las realidades estructurales de América Latina, con el fin de mejorar la gestión de residuos plásticos en la región.**

Uncertainty in Dynamic Data Envelopment Analysis Model with Optimal Control Principles

Paulo Nocera Alves Junior
Escuela de Ingeniería (EIC)
Universidad Católica del Norte (UCN)
Coquimbo, Chile
paulo.alves@ucn.cl
https://orcid.org/0000-0002-8906-788X

***Abstract*— This study is related to one of the models developed in the FONDECYT INICIACION Chilean project named "Stochastic Data Envelopment Analysis (DEA), principles of Optimal Control Theory (OCT), and inventory management: stochastic and dynamic cost efficiency analysis". The main aim of this project was to develop a novel Stochastic Data Envelopment Analysis (SDEA) model and also considering DEA model with principles of Optimal Control Theory (OCT). In the model of this study, we also employ a Window Analysis approach jointly with Chance-Constrained Programming for constructing the probabilistic constraints of each window over time. Average values are used to avoid the infeasibility of specific values due to a situation similar to super-efficiency in stochastic efficiency models. It is applied to inventory control system of the Decision-Making Units (DMUs), for example, considering costs of inventories as Intermediate Measures, the ones related to production or purchasing can be used as inputs, while the cost of good sold are outputs, because the sales are related to the demand. The motivating example application of the model resulted in a realistic and robust model that captures dynamics and uncertainties.**

Keywords*— *Stochastic DEA, Chance-Constrained Programming, Optimal Control Theory, Window Analysis, Dynamic Efficiency, Inventory Control.

I. Introduction

Evaluating performance in dynamic and uncertain environments is a challenge in operations and supply chain management. Retail companies, production–inventory systems, and multi-period decision environments exhibit strong temporal dependencies and uncertainties, particularly through inventory levels or theirs costs acting as inter-period link variables. Classical DEA models [1] do not account for such dynamics, while existing dynamic DEA models often ignore uncertainty and the structural relationships between demand, production, and inventory [2].

This study focuses on performance indicators to analyze the dynamic and stochastic efficiency of inventory control systems, drawing on Data Envelopment Analysis (DEA) and the principles of Optimal Control Theory (OCT).

Previous DEA-OCT models [3] did not consider characteristics of recent models, such as intermediate measures or total cost efficiency [4] [5]. With this in mind, the objective of this paper is to propose and develop a Chance-Constrained DEA model with Optimal Control Theory (OCT) principles. This model optimally relates inputs, outputs, and intermediate variables, considering the system's uncertainty and stochastic components, building upon the DEA-OCT model [6] [7] and incorporating chance constraints.

The OCT principles provides a natural mathematical framework for representing these relationships, considering that Demand or Costs of Goods Sold (COGS) acts as a disturbance variable, Production, Purchasing a Product, Ordered quantity or their costs (CPP) acts as the control variable, and Inventory levels or their costs (CI, and it can be split into two parts, for the beginning and final parts of the period) and acting as state variables linking consecutive periods.

Likewise, existing stochastic DEA models, such as Chance-Constrained DEA [8] [9] [10], lack dynamic constraints ensuring feasibility across time, and measuring it under uncertainty is a difficult task.

Recent work in retail cost efficiency [6] [7] highlights two major gaps: The need for stochastic DEA models that preserve the dynamics of inventory systems, and the need for models using total cost variables to avoid distortions created by unitary cost assumptions and computing total cost efficiency.

This research contributes by developing a dynamic CCDEA model with OCT principles that incorporates stochastic behavior via probabilistic constraints, dynamic feasibility via state-transition constraints, and intermediate measures, the mentioned total cost efficiency, and window analysis to compute and consider dynamics and uncertainties.

II. Methodology

A. Modeling Components

The proposed model integrates four main modeling components: Stochastic, OCT principles, Intermediate measures, and Total Costs.

Chance-Constrained DEA (CCDEA) are used to incorporate the probabilistic constraints related to the inputs, intermediate measures, and outputs, through $\Pr[\text{constraints}] \geq 1-\alpha$, which is converted to deterministic equivalents using the inverse of the standardized normal.

Optimal Control Theory (OCT) Principles give dynamics relating demand or COGS, Production, Purchasing, Ordered quantity or CPP, and Inventory levels or CI (split into CII and CIF) to link these variables and consecutive periods, ensuring realistic dynamics of the systems.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

In DEA literature, links and carry-overs can be used as Intermediate Measures and inventories are common variables used as intermediate measures. Inventory at the final part of period t becomes inventory at the beginning of period t+1, avoiding projections that violate these physical dynamical constraints.

And we used total costs, instead of unitary costs and quantities to calculate total cost efficiency, because it prevents distortions [4], and the model can be applied using actual total costs data from accountability reports and improving comparability, because many countries use the International Financial Reporting Standards (IFRS).

B. Model Foundations

The discrete-time dynamic model to estimate the total cost efficiency [6] [7] has the following formulation (Equations (1) to (10)):

$$\min \quad J=\sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{j=1}^{n-1} Cx_{tj0}^{p}+\sum_{h=1}^{l-1} Cz_{th0}^{p}+Cx_{tn0}^{p}+Cz_{tl0}^{p}\right] \tag{1}$$

subject to

$$\sum_{k=1}^{z} Cx_{tjk}\lambda_{tk} \leq Cx_{tj0}^{p} \quad (j=1,2,\ldots,n-1, t=1,2,\ldots,T) \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{z} Cx_{tnk}\lambda_{tk} \leq Cx_{tn0}^{p} \quad (t=1,2,\ldots,T) \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^{z} Cz_{thk}\lambda_{tk} + S_{h}^{free} = Cz_{th0}^{p} \quad (h=1,2,\ldots,l-1, t=1,2,\ldots,T) \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{z} Cz_{tlk}\lambda_{tk} + S_{l}^{free} = Cz_{tl0}^{p} \quad (t=1,2,\ldots,T) \tag{5}$$

$$\sum_{k=1}^{z} Cy_{tik}\lambda_{tk} \geq Cy_{ti0} \quad (i=1,2,\ldots,m-1, t=1,2,\ldots,T) \tag{6}$$

$$\sum_{k=1}^{z} Cy_{tmk}\lambda_{tk} \geq Cy_{tm0} \quad (t=1,2,\ldots,T) \tag{7}$$

$$\sum_{k=1}^{z} \lambda_{tk} = 1 \quad (t=1,2,\ldots,T) \tag{8}$$

$$Cx_{tn0}^{p} - Cz_{tl0}^{p} + Cz_{(t-1)l0}^{p} = Cy_{tm0} \quad (t=1,2,\ldots,T) \tag{9}$$

$$Cz_{(t=0)l0}^{p} = Cz_{(t=0)l0} \tag{10}$$

Where k is the index related to the DMU, DMU0 is the DMU under analysis, considering j inputs, were the n-th input is related to the control variable (input), considering h state variable (intermediate measure), and i outputs, were the m-th output is an exogenous variable (output), t is the period, Cz_{lkt} is the cost of the intermediate measure of the k-th DMU in period t, Cx_{jkt} is cost of the j-th input of the k-th DMU in period t, Cy_{ikt} is cost of the financial value of the i-th output of the k-th DMU in period t, Cz_{l0t}^{p}, Cx_{n0t}^{p} and Cx_{j0t}^{p} are the projection of the costs of each variable of the DMU under analysis (k=0) in period t, and λ_{kt} is the contribution of the k-th DMU to a DMU under analysis in period t. Pr[constraints]≥1−α, denote probability constraint, were α is the chance of failing to satisfy the constraints. And the efficiency is calculated by dividing the optimal costs by the observed costs.

The proposed model also incorporates features from [3] [4] [10], but it is mainly based on the works of [6] [7], specifically in the dual form, and with chance constraints. In this formulation, each constraint is transformed into Pr[constraints] ≥ 1−α, and its deterministic equivalent is computed by considering the inverse of the standard normal cumulative distribution function (CDF), as well as variance and covariance operators.

The covariance matrix was considered in its complete form, however, the variables could be treated as independent, or only the variance of specific variables could be considered. This covariance matrix is applied as part of the variance for each DMUk, as shown in equation (11):

$$\sigma_k^2 = \left[u_i, -w_g, -v_j\right] Cov(\mathrm{Cy,Cz,Cx}) \left[u_i, -w_g, -v_j\right]^T \tag{11}$$

Where $u_i, -w_g, -v_j$ are, respectively, the weights of the outputs, intermediate measures, and inputs, whereas $Cov(\mathrm{Cy,Cz,Cx})$ represents the covariance between the costs treated as random variables.

Regarding the OCT principle, it establishes dynamic relationships between variables, ensuring the feasibility of projected states. These constraints prevent unrealistic DEA projections, such as increasing demand without increasing production, or reducing inventory without adjusting order quantities.

And Window Analysis is incorporated to compute averages, variances or covariances for each time window, so, it is possible to compute efficiency scores that reflect system dynamics, as well as uncertainties.

C. Data

The motivating example in this presentation uses variables related to accounting costs, for instance, Inventory Cost (CI), which can be divided into Initial (CII) and Final (CIF), Cost of Goods Sold (COGS), and Cost of Purchased Products (CPP).

CPP represents the inputs or control variables (for example, related to purchased product, but it could be related to production), COGS represents the outputs or exogenous measures (for example, related to sales or demand), CI, CII and CIF represent the intermediate measures or state variables (for example, related to inventories).

III. RESULTS

Table 1 shows the results for the motivating example, including system efficiency of 30 DMUs, considering two windows of two periods each one, application of a deterministic DEA-OCT model and for the complete covariance matrix.

TABLE I. DEA-OCT – SYSTEM EFFICIENCIES (TWO WINDOWS OF 2 PERIODS EACH ONE)

DMU	DEA-OCT System Efficiencies	
	Deterministic (equivalent to alpha=50%)	***Stochastic, alpha=0.05, complete covariance matrix***
1	0.9922	0.9830
2	0.9870	0.9779
3	0.9818	0.9728
4	0.9667	0.9619
5	0.9914	0.9877
6	0.9862	0.9825
7	0.9811	0.9774
8	0.9760	0.9684
9	1	1
10	0.9948	0.9948
11	0.9896	0.9896
12	0.9961	0.9915
13	0.9908	0.9863
14	0.9856	0.9811
15	0.9805	0.9802
16	0.9946	0.9912
17	0.9894	0.9860
18	0.9842	0.9808
19	1	1
20	0.9948	0.9948
21	0.9896	0.9896
22	1	1
23	0.9947	0.9947
24	0.9895	0.9895
25	0.9987	1
26	0.9934	0.9947
27	0.9882	0.9895
28	1	1
29	0.9947	0.9947
30	0.9895	0.9895

Results indicate that incorporating uncertainty into DEA-OCT models changes some results of the model, including status of DMUs, because while the deterministic one had 4 efficient DMUs, the stochastic model showed 5 efficient DMUs, so it can change depending on the covariance matrix used, but it does not changed all efficiencies radically, showing that including chance-constraints could make the model more robust, considering uncertainties and probabilities, and OCT principles gives dynamics, but also could stabilize efficiencies across windows. So, it shows that including uncertainty matters.

Overall, the model avoids infeasible recommendations, such as reducing inventory levels while purchasing or producing more than what is needed to satisfy the demand, because it considers demand, supply and inventory balance related constraints, while providing more robust efficiency estimates that depend on the covariance matrix.

IV. Conclusion

This research proposes a novel Chance-Constrained DEA model with OCT principles. The model captures uncertainties, balance due to relationship among variables, temporal dependencies, and system dynamics. The motivating example application shows it is possible to give realistic recommendations considering dynamics and uncertainties.

Suggestion for future work includes studying other types of covariance matrix besides the complete one (for example, considering independent variables, or only the variance of a specific variable), linearizing the model, relaxing constraints to other control situations, extending the model to reinforcement-learning-based control, including variables outside the control system, including inflation/deflation, and developing network-structured dynamic stochastic DEA-OCT models or integrating it to other models.

Acknowledgements

The author Dr Paulo Nocera Alves Junior is supported by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) Iniciación en Investigación 2023, Project 11230508.

References

[1] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 2(6), 429-444.

[2] Fallah-Fini, S., Triantis, K., Johnson, A. L. (2014). Reviewing the literature on non-parametric dynamic efficiency measurement: state-of-the-art. Journal of Productivity Analysis, 41, 51-67.

[3] Sengupta, J. K. (1999). A dynamic efficiency model using data envelopment analysis. International Journal of Production Economics, 62(3), 209-218.

[4] Tone, K. (2002). A strange case of the cost and allocative efficiencies in DEA. Journal of the Operational Research Society, 53(11), 1225-1231.

[5] Tone, K., & Tsutsui, M. (2010). Dynamic DEA: A slacks-based measure approach. Omega, 38(3-4), 145-156

[6] Melo, I. C., et al. (2020). B2C E-commerce for Home Appliance in The Brazilian Market: A Cost Efficiency Investigation through a DEA-OCT Model. Internext, 15(2), 72-89.

[7] Melo, I. C., et al. (2023). Measuring the performance of retailers during the COVID-19 pandemic: Embedding optimal control theory principles in a dynamic data envelopment analysis approach. Operations Research Perspectives, 10, 100282.

[8] Land, K. C., Lovell, C. A. K., & Thore, S. (1993). Chance-constrained data envelopment analysis. Managerial and Decision Economics, 14(6), 541-554.

[9] Olesen, O. B., & Petersen, N. C. (1995). Chance constrained efficiency evaluation. Management Science, 41(3), 442-457.

[10] Shiraz, R. K., Hatami-Marbini, A., Emrouznejad, A., Fukuyama, H. (2020). Chance-constrained cost efficiency in data envelopment analysis model with random inputs and outputs Operational Research, 20(3), 1863-1898.

Aprendizaje, Secuenciación y Decisiones Irreversibles: El caso de la jubilación en Chile.

Camila Utreras-Cifuentes
Centro de Investigación en Complejidad Social
Universidad del Desarrollo
Santiago, Chile
cutrerasc@udd.cl

Denise Laroze
Centro de Investigación en Complejidad Social
Universidad del Desarrollo
Santiago, Chile
dalaroze@udd.cl

Óscar C. Vásquez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago Chile
oscar.vasquez@usach.cl

Las decisiones irreversibles, como la elección de una modalidad de jubilación, representan un desafío para las personas, especialmente debido a la necesidad de comprender conceptos tanto de la normativa legal que lo rige y así el marco financiero que lo define. En este trabajo presentamos un incipiente marco metodológico que busca contribuir a la toma de decisiones informadas en estos procesos, formalizando el diseño de secuencias de objetivos de aprendizaje (rutas de aprendizaje) basado en cuatro elementos principales: (i) definición de objetivos de aprendizaje específicos, (ii) descomposición de cada objetivo en conceptos elementales, (iii) establecimiento de relaciones de precedencia entre conceptos, representadas en una matriz de adyacencia, (iv) validación de estas dependencias mediante juicio experto y (v) construcción y validación de recursos de aprendizaje. El problema se formula como una variante del problema de la mochila con ítem secuenciados (KPsi, Knapsack Problem with scheduled ítems), formalizando matemáticamente el problema de secuenciación curricular (CSP, Curriculum Sequencing Problem), descrito en la literatura. Para mostrar la aplicabilidad del enfoque propuesto, se presentan algunos resultados preliminares para el caso de la educación previsional en Chile.

Keywords— secuenciación, aprendizaje, decisiones irreversibles, jubilación.

I. Introducción

Las decisiones de una sola vez, como la planificación previsional, difieren de los procesos de decisión rutinarios o iterativos. Su irreversibilidad y alto impacto incrementan la necesidad de contar con información clara y oportuna [1], [2], [3]. A pesar de su relevancia, las herramientas educativas que apoyan estos procesos suelen centrarse en estrategias pedagógicas y han explorado en menor medida enfoques algorítmicos capaces de estructurar secuencias de aprendizaje de forma rigurosa y adaptativa [4], [5], [6], [7].

Este trabajo propone una mirada desde la investigación de operaciones al problema de la secuenciación instruccional. Formalizando objetivos de aprendizaje, descomponiéndolos en conceptos y estableciendo precedencias, es posible modelar el proceso como un grafo dirigido acíclico, base para aplicar modelos de optimización que generen secuencias que respeten limitaciones cognitivas y de tiempo y favorezcan la comprensión.

Este trabajo fue parcialmente financiado por FONDECYT N°1250538.

II. Marco Teórico

A. Problema de la mochila con ítem secuenciados y la secuenciación curricular

El problema de la mochila con ítem secuenciados *(KPsi, Knapsack Problem with scheduled ítems)* se introduce en [8], abordando el problema de selección y secuenciación de manera conjunta, encontrado variadas aplicación en sistemas productivos de bienes y servicios. Por otro lado, el problema de secuenciación curricular *(CSP, Curriculum Sequencing Problem*) surge inicialmente en el ámbito de los sistemas educativos inteligentes y adaptativos, siendo descrito como la función de seleccionar y ordenar dinámicamente contenidos de aprendizaje de acuerdo con el conocimiento previo y las necesidades del estudiante [9], [10], [11], buscando generar trayectorias que maximicen comprensión, minimicen redundancias y respeten restricciones de precedencia dentro de un marco conceptual determinado [12].

Este trabajo se inscribe en ambos problemas, buscando formalizar el CSP como una variante del KPsi. El objetivo es proponer un marco teórico que no solo permita conocer y organizar contenidos, sino que además permita determinar su secuencia en una ruta de aprendizaje particular considerando entre otras restricciones, aquellas de precedencia, capacidad, tiempo y recursos.

B. El caso del sistema Previsional Chileno

El proceso de jubilación en Chile es un ejemplo de toma de decisión irreversible, que considera un alto nivel de términos legales y con conceptos financieros difíciles de comprender. Las personas enfrentan la paradoja de la elección, donde demasiadas opciones pueden generar parálisis y llevar a delegar decisiones críticas a terceros ([13], [14], [15], [16], [17]), como asesores previsionales o agentes de seguros, lo que resulta en la pérdida de autonomía y posibles decisiones subóptimas.

Este desafío se agrava en un contexto donde el nivel de alfabetismo financiero es bajo [18], [19], [20]. La mayoría de las personas sólo enfrenta el proceso de jubilación una vez en la vida, y pocas han tenido previamente contacto con conceptos tales como Retiro Programado, Renta Vitalicia Inmediata, Renta Temporal con Renta Vitalicia Diferida o Retiro Programado con Renta Vitalicia Inmediata, además de otras cláusulas especiales

de cobertura, como lo son los periodos garantizados, aumentos temporales de pensión o periodos de diferimiento.

Con este nivel de dificultad y la importancia de tomar una decisión informada, se hace necesario generar una forma más amigable de comprender y aprender estos conceptos tan difíciles, sobre todo a la luz de una decisión irreversible, que se toma una sola vez en la vida y que podría traer consigo consecuencias para el futuro. Parte importante de los reclamos que recibe la Superintendencia de Pensiones en Chile, tienen que ver con "errores de entendimiento" de los conceptos al momento de tomar la decisión.

III. Metodología

La metodología propuesta problema consta de 2 fases. Una fase inicial que busca mapear el problema y comprender la magnitud de este y una segunda fase que tiene como objetivo resolver y dar una ruta óptima de aprendizaje.

A. Fase 1

Actualmente se está trabajando en la primera fase en conjunto con expertos previsionales de la Superintendencia de Pensiones, quienes han ido validando cada uno de los cinco pasos descritos a continuación:

El primer paso consistió en definir los objetivos de aprendizaje, estableciendo objetivos específicos que estuviesen alineados con la decisiones que deben tomar las personas cuando deciden jubilarse, por ejemplo comprender las modalidades de pensión, comprender el proceso para obtener una pensión, entre otros. Se definieron un total de 7 objetivos generales y 6 objetivos específicos. Los cuales fueron validados por los expertos de la entidad.

El segundo paso consistió en dividir cada uno de esos objetivos de aprendizaje (OAs) en conceptos elementales y que fuesen independientes entre ellos dentro de un mismo OA. Se definieron alrededor de 150 conceptos en total, los cuales pasaron por un proceso de depuración, donde se quitaron conceptos duplicados o muy similares entre ellos y se unieron otros que no tenían sentido de forma independiente obteniendo un total de 69 conceptos distintos.

El tercer paso fue establecer las relaciones de precedencia entre los conceptos, los cuales fueron plasmados en una matriz de adyacencia donde un valor de "1" en la posición α_{ij} indica si el concepto i es necesario para comprender el concepto j y 0 en caso de no serlo. Se establecieron 395 relaciones entre conceptos. Luego se eliminaron los ciclos entre conceptos (cuando 2 conceptos eran predecesores uno del otro) y los caminos duplicados, quedando con un total de 111 enlaces. Con esta matriz se generó un grafo que está ilustrado en la Fig. 1.

El cuarto paso, actualmente en ejecución, se procede con la validación de esta matriz de precedencia, donde en reuniones periódicas con los expertos, se han ido validando las definiciones de los conceptos, y las precedencias de estos. A la fecha se han validado 15 de los 69 conceptos, eliminado 1 y agregado 3 nuevos, dejando un total de 71. Estas reuniones consisten en evaluar un set de aproximadamente 8 conceptos por sesión de aproximadamente 90 minutos, donde se presenta una propuesta de conceptos necesarios para comprender otro, luego se discute entre los participantes y se llega a concesos para establecer si el concepto propuesto corresponde o no y si es necesario agregar algún otro.

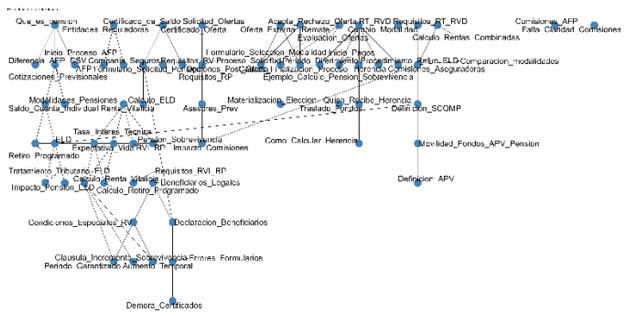


Fig. 1. Grafo de precedencia de conceptos sobre pensiones.

Finalmente, en la quinta etapa, con la matriz de precedencia validada se construirán los Recursos de Aprendizaje (RAs). Se construirán 4 RAs por concepto con un nivel diferente de dificultad, ya sea en uso del lenguaje (más o menos técnico) o en la visualización de la información (más o menos didáctico), esto quiere decir que estos RA contendrán la información necesaria para enseñar el concepto específico respondiendo a perfiles de usuario diferentes: personas familiarizadas con el proceso de pensiones previamente versus personas que no, y personas que se les facilita comprender nueva información versus personas que no. Estos RAs también serán validados por los expertos de la Superintendencia de Pensiones.

B. Fase 2

Una vez validada la matriz de precedencia y los recursos de aprendizaje, el problema se formalizará la variante KPsi, introducción la restricciones de precedencia y de tiempo como un nuevo ingrediente, formalizando su definición, formulando un modelo matemático y explorando diferentes formas de resolución (e.g. exactas, heurísticas, aproximadas). El resultado permitirá generar secuencias de aprendizaje que maximicen la comprensión de los conceptos bajo restricciones de tiempo y carga cognitiva. La función objetivo busca maximizar la comprensión de los conceptos, mientras que las restricciones aseguran que ningún concepto se presente antes de sus predecesores en el grafo dirigido acíclico y que el tiempo dedicado al aprendizaje no supere el tiempo disponible, complementando enfoques pedagógicos tradicionales.

IV. Conclusiones y Aportes

Este trabajo presenta un marco metodológico que formaliza el diseño de secuencias de aprendizaje como una variante del problema de la mochila con ítems secuenciados, contribuyendo a la educación previsional en Chile, caracterizado por considerar decisiones irreversibles y de alta dificultad conceptual y cognitiva. Se espera que este en enfoque proporcione un alternativa para mejorar la autonomía y calidad de las decisiones previsionales, contribuyendo a reducir errores de entendimiento documentados en el sistema actual.

Como trabajo futuro se plantea: (i) integrar variables emocionales en los modelos de optimización, (ii) evaluar empíricamente la efectividad de las secuencias propuestas en

población adulta mayor, y (iii) explorar la aplicabilidad de la metodología a otros dominios de decisiones críticas, como salud o planificación financiera personal.

REFERENCES

[1] L. Krava, S. Ayal, y G. Hochman, «Time Is Money: The Effect of Mode-of-Thought on Financial Decision-Making», Front. Psychol., vol. 12, p. 735823, sep. 2021, doi: 10.3389/fpsyg.2021.735823.

[2] P. Guo, «One-Shot Decision Theory: A Fundamental Alternative for Decision Under Uncertainty», en Human-Centric Decision-Making Models for Social Sciences, vol. 502, P. Guo y W. Pedrycz, Eds., en Studies in Computational Intelligence, vol. 502. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 33-55. doi: 10.1007/978-3-642-39307-5_2.

[3] K. J. Arrow y A. C. Fisher, «Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility», Q. J. Econ., vol. 88, n.o 2, p. 312, may 1974, doi: 10.2307/1883074.

[4] C. Grobbelaar y L. Alsemgeest, «Gamification as an Educational Tool for Retirement Planning», Adult Learn., p. 10451595241286913, sep. 2024, doi: 10.1177/10451595241286913.

[5] T. J. Dunn y M. Kennedy, «Technology Enhanced Learning in higher education; motivations, engagement and academic achievement», Comput. Educ., vol. 137, pp. 104-113, ago. 2019, doi: 10.1016/j.compedu.2019.04.004.

[6] B. Cromwell, C. Wilkerson, S. Shekhar, y I. Moore, «Adaptive Learning Systems for Personalized Adult Education», nov. 2024.

[7] C. I. Johnson y J. L. Solberg, «Designing an Adaptive Instructional System for Financial Literacy Training», en HCI International 2023 – Late Breaking Papers, vol. 14060, P. Zaphiris, A. Ioannou, R. A. Sottilare, J. Schwarz, F. Fui-Hoon Nah, K. Siau, J. Wei, y G. Salvendy, Eds., en Lecture Notes in Computer Science, vol. 14060. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 116-127. doi: 10.1007/978-3-031-48060-7_9.

[8] F. Diaz-Nuñez, F. Quezada y Vásquez O.C. The knapsack problem with scheduled items. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2018, vol. 69, p. 293-300

[9] P. Brusilovsky, «Adaptive Hypermedia: From Intelligent Tutoring Systems to Web-Based Education», en Intelligent Tutoring Systems, vol. 1839, G. Gauthier, C. Frasson, y K. VanLehn, Eds., en Lecture Notes in Computer Science, vol. 1839. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000, pp. 1-7. doi: 10.1007/3-540-45108-0_1.

[10] P. Brusilovsky, E. Schwarz, y G. Weber, «ELM-ART: An intelligent tutoring system on world wide web», en Intelligent Tutoring Systems, vol. 1086, C. Frasson, G. Gauthier, y A. Lesgold, Eds., en Lecture Notes in Computer Science, vol. 1086. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996, pp. 261-269. doi: 10.1007/3-540-61327-7_123.

[11] P. Brusilovsky y J. Vassileva, «Course sequencing techniques for large-scale web-based education», Int. J. Contin. Eng. Educ. Life-Long Learn., vol. 13, n.o 1/2, p. 75, 2003, doi: 10.1504/IJCEELL.2003.002154.

[12] J.-P. Doignon y J.-C. Falmagne, Knowledge Spaces. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. doi: 10.1007/978-3-642-58625-5.

[13] K. Kinjo y T. Ebina, «Paradox of choice and consumer nonpurchase behavior», AI Soc., vol. 30, n.o 2, pp. 291-297, may 2015, doi: 10.1007/s00146-014-0546-7.

[14] M. Piasecki y S. Hanna, «A Redefinition of the Paradox of Choice», en Design Computing and Cognition '10, J. S. Gero, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, pp. 347-366. doi: 10.1007/978-94-007-0510-4_19.

[15] E. Reutskaja, S. Iyengar, B. Fasolo, y R. Misuraca, «Cognitive and affective consequences of information and choice overload», en Routledge Handbook of Bounded Rationality, Routledge, 2020.

[16] B. Schwartz, «The Paradox Of Choice: Why More Is Less», Paradox Choice Why More Less, ene. 2004, [En línea]. Disponible en: https://works.swarthmore.edu/fac-psychology/198

[17] B. Schwartz, «The Paradox of Choice», en Positive Psychology in Practice, John Wiley & Sons, Ltd, 2015, pp. 121-138. doi: 10.1002/9781118996874.ch8.

[18] O. M. Landerretche y C. Martínez, «Voluntary savings, financial behavior, and pension finance literacy: evidence from Chile», J. Pension Econ. Finance, vol. 12, n.o 3, pp. 251-297, jul. 2013, doi: 10.1017/S1474747212000340.

[19] A. Lusardi y O. S. Mitchell, «Financial literacy around the world: an overview», J. Pension Econ. Finance, vol. 10, n.o 4, pp. 497-508, oct. 2011, doi: 10.1017/S1474747211000448.

[20] A. Lusardi y O. S. Mitchelli, «Financial Literacy and Retirement Preparedness: Evidence and Implications for Financial Education», Bus. Econ., vol. 42, n.o 1, Art. n.o 1, ene. 2007, doi: 10.2145/20070104.

Session N°1 – Track N°3

Combinatorial Optimization

Chair: Rey, C. *(Universidad del Bío-Bío)*
Place: G6-056
Time: 10:40 – 11:55

How to Measure Complex Robustness and Sensitivity in Linear Programming

Time: 10:40 – 10:55
Author: Hladík, M. *(Charles University)*

Políticas Simples de Emparejamiento Dinámico

Time: 11:00 – 11:15
Authors:

- Simon, F. *(Universidad de Chile)*
- Arnosti, N. *(University of Minnesota)*

An Adaptive Algorithm for the Polyhedral-Outer Approximation of Convex Functions

Time: 11:20 – 11:35
Authors:

- Boyardi-Alache, N. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Escalona, P. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Angulo, A. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*

Automatic Construction of Interpretable Heuristics for the Polynomial Robust Knapsack Problem

Time: 11:40 – 11:55
Authors:

- Rey, C. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Contreras-Bolton, C. *(Universidad de Concepción)*
- Silva-Muñoz, M. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Parada, V. *(Universidad de Santiago de Chile)*

How to Measure Complex Robustness and Sensitivity in Linear Programming

Milan Hladík
Department of Applied Mathematics
Faculty of Mathematics and Physics, Charles University
Prague, Czech Republic
hladik@kam.mff.cuni.cz

***Abstract*—The classical sensitivity analysis in linear programming measures the effects of variations of only one selected parameter. Such variations are very simple and do not reflect the real life complexity. That is why we consider variations of possibly all input coefficients, making use of a given matrix norm. More concretely, we discuss the problem how to compute the maximum variations of the input data in the given norm such that the computed optimal basis remains optimal. We present general results for an arbitrary norm and we also investigate in detail some commonly used norms such as the spectral and the maximum norm. Further, we analyse computational complexity of the problem and show for which norms the problem is efficiently computable and for which not.**

***Index Terms*—linear programming, robustness, sensitivity analysis, tolerance analysis, matrix norm, NP-hardness**

I. Introduction

Sensitivity Analysis: Sensitivity analysis in linear programming (LP) [2] is a traditional tool that measures the effect of variations of one selected coefficient on the optimal value and the optimal solution. However, such one-coefficient variations are very simple and not realistic cases. That is why there were developed several extensions of this classical approach. For instance, the tolerance approach to sensitivity analysis [1], [5], [7], which was introduced to handle independent and simultaneous variations of selected coefficients, or multiparametric programming [2], [4], [6], which provides a general framework for more complex variations.

Our Goal: We present quite a general approach to sensitivity analysis. The idea is to measure the robustness of an optimal solution by the distance to the nearest point where the optimal basis is no longer optimal.

Linear Programming: Herein, we consider the LP problem in the form

$$\min\ c^T x \quad \text{subject to} \quad Ax = b,\ x \geq 0, \tag{1}$$

where $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ and $c \in \mathbb{R}^n$. Let B be an optimal basis and $N \coloneqq \{1,\dots,n\} \setminus B$ the set of nonbasic indices. We use A_B to denote the submatrix of A consisting of the basic columns and a similar notation is used for vectors and nonbasic indices.

Milan Hladík was supported by the Czech Science Foundation Grant 25-15714S.

Recall that optimality of basis B is expressed by the following three conditions:

$$\text{(regularity)} \quad A_B \text{ is nonsingular,} \tag{2}$$

$$\text{(feasibility)} \quad A_B^{-1} b \geq 0, \tag{3}$$

$$\text{(optimality)} \quad c_N^T - c_B^T A_B^{-1} A_N \geq 0^T. \tag{4}$$

It is sometimes useful to express condition (3) as the feasibility of the linear system

$$A_B x_B = b, \quad x_B \geq 0,$$

and condition (4) as feasibility of the linear system

$$A_N^T y \leq c_N,\ A_B^T y = c_B.$$

Problem Statement: We are given a matrix norm, the input data (A,b,c) and the corresponding optimal basis B. Now, the problem is to find the nearest data (A',b',c') for which B is not an optimal basis. We call this distance as *the radius of basis stability* and mathematically it is defined as

$$\delta^* \coloneqq \inf\big\{\|(A',b',c') - (A,b,c)\|; \\ B \text{ is not an optimal basis for } (A',b',c')\big\}.$$

Herein, we write infimum since the value of δ^* may or may not be attained.

II. General Approach

The radius of basis stability can be expressed as

$$\delta^* = \min\{\delta_1, \delta_2, \delta_3\},$$

where δ_1, δ_2 and δ_3 are the distances to the nearest data violating conditions (2), (3) and (4), respectively. In this way, we can reduce the whole problem into three sub-problems.

The value δ_1 is called *regularity radius* and it is quite a well studied problem [3]. It is known that for the spectral or Frobenius norms, it is determined by the smallest singular value, and thus efficiently computable. In contrast, for the max-norm (Chebyshev norm), the computation of δ_1 is NP-hard.

It turns out that also the quantities δ_2 and δ_3 can be computed by determining the regularity radius of a certain (linear) number of matrices. Therefore, we can compute the radius of basis stability efficiently for the spectral or Frobenius norms. For the max-norm it is computationally hard, so we propose suitable lower bounds.

III. A Simple Illustrative Example

Example 1: Consider the LP problem (1) with

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 10 \\ 5 \end{pmatrix}, \quad c = (1, 2, 3)^T.$$

The optimal solution is the point $x^* = (5, 5, 0)^T$, and the corresponding optimal basis is $B = (1, 2)$, that is, the first two columns of matrix A.

Let us choose the Chebyshev norm to measure the robustness and follow the general approach to compute the radius of basis stability δ^*. Using the standard formula to compute the regularity radius (see [3], [5] and references therein), we compute $\delta_1 = 1$. This means that all entries of

$$A_B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}$$

can vary independently and simultaneously by less than 1 in either direction, while the matrix A_B remains nonsingular.

Similarly, we obtain $\delta_2 = 0.833$ and $\delta_3 = 0.2174$, from which $\delta^* = \min\{\delta_1, \delta_2, \delta_3\} = 0.2174$. Its interpretation is that basis B remains optimal for any 0.2174-variation of the data. That is, all entries of A, b and c can independently and simultaneously decrease or increase by less than 0.2174, while preserving the optimal basis.

IV. Numerical Examples

We illustrate the stability radius on a nutritious problem. Further, to numerically compare the running time and the radius for different norms, we carried out a series of experiments on random data. They more-or-less confirm the theoretical findings: the exact computation of δ^* is efficient for the spectral norm, but intractable for the max-norm. Nevertheless, it was surprising how tight was the lower bound based on the equivalence between the matrix norms.

V. Conclusion

We described a new way to measure sensitivity and robustness for a linear programming problem. For some norms, the measure is efficiently computable; for some others, it is not, but it can be tightly approximated. The limiting factor of our approach, however, is that it utilizes the basis invariancy. Thus, it remains as a challenging problem to avoid it and use a more convenient type of invariancy that is not so influenceable by linear programming degeneracy.

References

[1] S. Curry, I. Lee, S. Ma, and N. Serban, "Global sensitivity analysis via a statistical tolerance approach," Eur. J. Oper. Res., vol. 296(1), pp. 44–59, 2022.

[2] T. Gal and H. J. Greenberg, eds., Advances in Sensitivity Analysis and Parametric Programming. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.

[3] D. Hartman and M. Hladík, "Regularity radius: Properties, approximation and a not a priori exponential algorithm," Electron. J. Linear Algebra, vol. 33, pp. 122–136, 2018.

[4] M. Hladík, "Multiparametric linear programming: support set and optimal partition invariancy," Eur. J. Oper. Res., vol. 202(1), pp. 25–31, 2010.

[5] M. Hladík, "Tolerance analysis in linear systems and linear programming," Optim. Methods Softw., vol. 26(3), pp. 381–396, 2011.

[6] N. Mehanfar and A. G. Hadigheh, "Optimal partition invariancy in multi-parametric linear optimization," J. Math. Model., vol. 10(3), pp. 433–448, 2022.

[7] R. E. Wendell, "Linear programming. III: The tolerance approach," in Advances in sensitivity analysis and parametric programming, chapter 5, T. Gal et al., eds. Dordrecht: Kluwer, 1997, pp. 1–21.

Políticas Simples de Emparejamiento Dinámico

1st Felipe Simon
Facultad de Economía y Negocios
Universidad de Chile
Santiago, Chile
fsimon@fen.uchile.cl

2nd Nick Arnosti
Industrial and Systems Engineering
University of Minnesota
Minneapolis, MN, USA

***Abstract*—Estudiamos un modelo fundacional de mercados de emparejamiento dinámico con abandono. Este modelo ha sido estudiado por [1] y [2], otros autores han estudiado casos particulares de este modelo. En este modelo emparejar dos agentes genera una recompensa y el objetivo es maximizar la tasa a la que se obtienen recompensas en el largo plazo.**

Comparamos el rendimiento de políticas simples (que identifican de antemano un conjunto de emparejamientos "aceptables" y los realizan lo antes posible) con el rendimiento de una política omnisciente que conoce la secuencia completa de llegadas y abandonos.

Usamos una novedosa familia de programas de optimización lineal (LP^{ALG}) para identificar que política simple seguir.

Demostramos que LP^{ALG} es una cota inferior a la política identificada en dos casos (Teorema 1):

- **Cuando todos los agentes tienen la misma tasa de abandono.**
- **Cuando el mercado es bipartito y todos los agentes del mismo lado del mercado tienen la misma tasa de abandono.**

También demostramos que el valor de LP^{ALG} es al menos la mitad de la tasa de recompensa obtenida por la política omnisciente. Por lo tanto, para ambos casos, esta política simple siempre obtiene al menos la mitad de la tasa de recompensa de la política omnisciente. Esto mejora el límite de $1/8$ de [1]. En ambos casos, el límite de $1/2$ es lo mejor que se puede obtener: ninguna política en línea puede asegurar una mejor garantía (Teorema 2).

Para demostrar estos resultados, introducimos un nuevo programa lineal que acota superiormente la tasa de recompensa obtenida por la política omnisciente. Esto mejora las cotas superiores presentadas por [1] y [3].

Evidencia numérica sugiere que nuestra política simple alcanza el limite de $1/2$ de la tasa de la política omnisciente incluso cuando las condiciones sobre las tasas de abandono mencionadas anteriormente no se satisfacen.

***Index Terms*—emparejamiento, Procesos Estocásticos, Programación lineal**

I. Introducción

Estudiamos un mercado de emparejamiento dinámico centralizado con agentes impacientes. En este modelo hay un set finito $\mathcal{T}$ de tipos de agentes. Agentes del tipo $i \in \mathcal{T}$ llegan de acuerdo a un proceso Poisson con tasa λ_i. Los agentes abandonan el sistema cuando son emparejados con otro agente, pero también pueden *abandonar* el sistema sin emparejarse. El tiempo máximo que un agente del tipo i permanecerá en el sistema antes de abandonar sigue una distribución exponencial con tasa μ_i. La recompensa por emparejar un agente del tipo j con un agente del tipo i que llegó antes es r_{ij}. Una *instancia* $\mathcal{I}$ de nuestro problema está definida por los tipos $\mathcal{T}$, las tasas de llegada $\{\lambda_i\}_{i\in\mathcal{T}}$, las tasas de abandono $\{\mu_i\}_{i\in\mathcal{T}}$, y las recompensas $\{r_{ij}\}_{i,j\in\mathcal{T}}$.

Un planificador central debe elegir una política π, que especifica qué tipos de agente emparejar. Nos interesa la tasa de recompensa a largo plazo (estado estacionario), que denotamos $V(\pi,\mathcal{I})$. Nuestro punto de referencia es la tasa máxima de recompensa que una política omnisciente (con información perfecta sobre llegadas y abandonos futuros) puede obtener.

El emparejamiento dinámico con abandono tiene distintas aplicaciones, incluyendo donación de riñones, vivienda pública y juegos en línea. Nuestro problema ha sido estudiado por [1] y [2] (aunque este último usa la política óptima *en línea* como punto de referencia). Casos especiales de este problema, donde el grafo de emparejamientos posibles es bipartito y un lado debe emparejarse inmediatamente, han sido estudiados por [3] y [4].

En este trabajo, estudiamos políticas "simples", que identifican un conjunto de emparejamientos aceptables y realizan estos emparejamientos tan pronto como estén disponibles. Más precisamente, una política simple está especificada por "preferencias" $\succ_j$ para cada tipo $j \in \mathcal{T}$. Cada $\succ_j$ es un ordenamiento de un subconjunto de $\mathcal{T}$; nos referimos a este subconjunto como los emparejamientos "aceptables" para j. Dadas estas preferencias, una política simple opera de la siguiente manera. Cuando llega un agente del tipo j, se empareja con su tipo preferido más alto de acuerdo a $\succ_j$ que esté presente. Si no hay tipos aceptables presentes, entonces este agente se une al grupo de agentes en espera.

II. Contribuciones.

Proponemos un algoritmo que, dado una instancia $\mathcal{I}$, recomienda una política simple $\text{ALG}(\mathcal{I})$. Denotamos por $\text{OMN}(\mathcal{I},t)$ la tasa de recompensa esperada por la política omnisciente en el intervalo de tiempo finito $[0,t]$ y definimos $\text{OMN}(\mathcal{I}) = \lim_{t\to\infty} \text{OMN}(\mathcal{I},t)$. Definimos la *razón competitiva* de una política π como

$$\min_{\mathcal{I}} \frac{V(\pi,\mathcal{I})}{\text{OMN}(\mathcal{I})} \tag{1}$$

Nuestro resultado principal establece condiciones bajo las cuales nuestra política simple recomendada obtiene una razón competitiva de $1/2$. La siguiente definición captura la condición necesaria para que este resultado se cumpla.

Definición 1: Una instancia $\mathcal{I}$ es **bipartita** si el conjunto de tipos $\mathcal{T}$ puede ser particionado en $\mathcal{T}_1$ y $\mathcal{T}_2$ tal que $r_{ij} \leq 0$ si $\{i,j\} \subseteq \mathcal{T}_1$ o $\{i,j\} \subseteq \mathcal{T}_2$.

Definición 2: Una instancia $\mathcal{I}$ tiene **abandono homogéneo** si

- $\mu_i = \mu_j$ para todo $i,j \in \mathcal{T}$, o
- $\mathcal{I}$ es bipartito y $\mu_i = \mu_j$ para todo $\{i,j\} \subseteq \mathcal{T}_k$ para $k \in \{1,2\}$.

Teorema 1: Para toda instancia $\mathcal{I}$ con abandono homogéneo,

$$V(\text{ALG}(\mathcal{I}),\mathcal{I}) \geq \frac{1}{2}\text{OMN}(\mathcal{I}).$$

Este resultado es una mejora sobre el resultado de [3], quienes muestran que se puede obtener una razón competitiva de $1/2$ cuando el grafo de compatibilidad es bipartito, hay un solo tipo en un lado, y el otro lado abandona inmediatamente. Para comparar, el Teorema 1 permite un número arbitrario de tipos en cada lado, y permite que ambos lados tengan algo de paciencia.

El Teorema 1 también mejora la razón competitiva de $1/8$ establecida por [1], quienes no requieren la suposición de abandono homogéneo. Es posible que la conclusión del Teorema 1 también se mantenga sin esta suposición: nuestras simulaciones aún no han identificado un caso donde $V(\text{ALG}(\mathcal{I}),\mathcal{I}) < \frac{1}{2}\text{OMN}(\mathcal{I})$.

Este resultado es ajustado, ya que no se puede garantizar una razón competitiva mejor que $1/2$ para políticas sin información sobre el futuro:

Teorema 2: Fija $\epsilon > 0$. Existe una instancia $\mathcal{I}$ con abandono homogéneo tal que para cualquier política Markoviana π,

$$V(\pi,\mathcal{I}) < \left(\frac{1}{2}+\epsilon\right)\text{OMN}(\mathcal{I}).$$

Una cota superior de $1/2$ se puede establecer usando una instancia bipartita con tres tipos en la que todos los agentes tienen tasas de abandono idénticas, o usando una instancia no bipartita con dos tipos que tienen tasas de abandono idénticas.

Hay dos componentes principales en el resultado del Teorema 1. El primero es un algoritmo para identificar una política simple. Esto implica dos pasos. 1.

1) **Nueva familia de programas lineales**. Introducimos una nueva familia de programas lineales $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I},\mathcal{M})$, cada uno asociado con un conjunto de emparejamientos posibles $\mathcal{M} \subseteq \mathcal{T} \times \mathcal{T}$. Mostramos que ciertas soluciones "adecuadas" de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I},\mathcal{M})$ corresponden naturalmente con políticas simples.
2) **Encontrar soluciones adecuadas**. Proporcionamos un procedimiento que encuentra un conjunto $\mathcal{M}$ donde la solución óptima de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I},\mathcal{M})$ es adecuada.

El segundo componente es demostrar que nuestro algoritmo obtiene una recompensa de al menos $\frac{1}{2}\text{OMN}(\mathcal{I})$. La prueba utiliza los siguientes pasos.

1) **Cota inferior para nuestra política simple.** Si la instancia $\mathcal{I}$ tiene abandonos homogéneos, entonces el valor de la solución óptima de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I},\mathcal{M})$ es una cota inferior para el valor de la política simple asociada.
2) **Cota superior para cualquier política.** Proporcionamos un nuevo programa lineal que acota superiormente $\text{OMN}(\mathcal{I})$. Esta cota es más ajustada que las utilizadas en trabajos anteriores.
3) **Relación entre cotas inferiores y superiores.** Mostramos que para el conjunto $\mathcal{M}$ seleccionado por nuestro procedimiento, el valor de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I},\mathcal{M})$ es al menos la mitad del valor de la cota superior del punto anterior.

Podemos resumir la estrategia usada en la demostración con la siguiente secuencia de desigualdades:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I}) &\leq \text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I},\mathcal{M}) \\ &\leq V(\text{ALG}(\mathcal{I}),\mathcal{I}) \\ &\leq \text{OMN}(\mathcal{I}) \\ &\leq \text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})\end{aligned}$$

Un paso fundamental para demostrar el Teorema 1 es el Lemma 1. Este lemma establece que, bajo ciertas condiciones, la probabilidad de que al menos un agente de un conjunto de tipos S esté presente en el sistema es al menos γ_S veces la esperanza del número de agentes de tipo S presentes. Aquí, γ_S es una constante que depende únicamente de las tasas de llegada y abandono de los tipos en S:

Lemma 1: Para cualquier política Markoviana π, sea $N^\pi = \{N_i^\pi\}_{i\in\mathcal{T}}$ una variable aleatoria muestreada del número de agentes en estado estacionario usando la política π. Sea $S \subseteq \mathcal{T}$, y define

$$\gamma_S = \frac{1-e^{-\sum_{i\in S}\lambda_i/\mu_i}}{\sum_{i\in S}\lambda_i/\mu_i}. \tag{2}$$

Si $\mu_i = \mu_j$ para todo $i,j \in S$, entonces

$$\mathbb{P}(\sum_{i\in S} N_i^\pi > 0) \geq \gamma_S \mathbb{E}[\sum_{i\in S} N_i^\pi]. \tag{3}$$

Para la política que no hace emparejamientos, (3) se cumple con igualdad para todos los S (sin necesidad de suposiciones sobre los μ_i). Esto se debe a que cuando no se hacen emparejamientos, los N_i^π son variables aleatorias de Poisson independientes con media λ_i/μ_i. Por lo tanto, una interpretación de Lemma 1 es que la razón entre el *número esperado* de agentes de tipo S en el sistema y la probabilidad de que haya al menos *uno* agente de tipo S es máxima cuando no se hacen emparejamientos.

III. "SKETCH" TEOREMA 1

Esta sección aborda algunas de las ideas principales detrás del Teorema 1. Para esto es útil incluir la siguiente notación: para una política π usamos x_{ij}^π para denotar la tasa la que se emparejan agentes de tipo i con agentes de tipo j en el largo plazo. Por lo tanto, la tasa de recompensa para esta política se puede escribir como $V(\pi,\mathcal{I}) = \sum_{i,j} r_{ij}x_{ij}^\pi$. A continuación se ahonda en los tres pasos necesarios para demostrar el Teorema 1:

Cota inferior para nuestra política simple. Para definir que política seguir se introduce una familia de programas lineales $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$. Las variables de decisión de estos programas son $\mathbf{n}$ (que aproxima el número de agentes de cada tipo en el sistema) y $\mathbf{x}$ (que aproxima la tasa a las que se realizan emparejamientos). La Figura 1 presenta una explicación gráfica de porque la solución optima $(\mathbf{n}^*, \mathbf{x}^*)$ de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$ es una cota inferior a la política simple π asociada a esta solución.

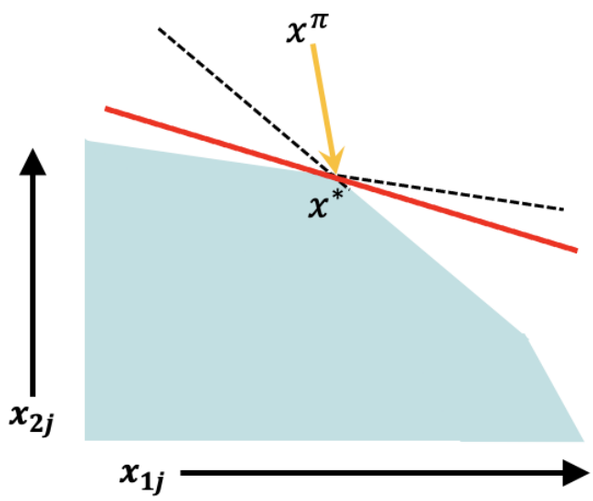


Fig. 1. La región azul representa el politopo de soluciones factibles para $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$. El punto $\mathbf{x}^*$ es un vértice de este politopo. La línea roja está determinada por las recompensas $\mathbf{r}$, y representa el conjunto de puntos que tienen el mismo valor objetivo que $\mathbf{x}^*$. Aunque $\mathbf{x}^{\pi}$ no necesariamente domina componente por componente a $\mathbf{x}^*$, si se puede demostrar que la "flecha" desde $\mathbf{x}^{\pi}$ hasta $\mathbf{x}^*$ "atraviesa" la región factible, lo que implica que $\mathbf{x}^{\pi}$ tiene un valor objetivo más alto que $\mathbf{x}^*$ (se encuentra por encima de la línea roja). Este resultado utiliza el Lemma 1.

Cota superior para cualquier política. Para encontrar esta cota se utiliza la propiedad PASTA de los procesos Poisson. Esta propiedad permite construir un programa lineal $\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$ que acota la tasa a la que se realizan emparejamientos usando la probabilidad de que exista al menos un agente presente al momento de la llegada de otro agente.

Relación entre cotas inferiores y superiores. Para demostrar que $\frac{1}{2}\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I}) \leq \text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$ se usan los duales de cada programa lineal. La estructura de estos programas duales junto con la dualidad fuerte permite establecer esta desigualdad.

IV. Experimentos Numéricos

Estos experimentos numéricos se realizan para ilustrar los resultados teóricos presentados en este trabajo. En particular, queremos mostrar evidencia de que la política $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$ es una cota inferior para la política simple asociada incluso en instancias que no tienen abandonos homogéneos. Además, queremos dar una idea de cuán ajustadas son las diferentes cotas presentadas en este trabajo.

En las figuras 2, 3 y 4 comparamos el valor de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$, $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$, $\text{OMN}(\mathcal{I}, t)$ y $\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$ para diferentes instancias. Aquí, $\text{ALG}(\mathcal{I})$ es la política simple asociada a la instancia $\mathcal{I}$, y $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$ es la tasa de recompensa esperada de esta política cuando se ejecuta en el intervalo de tiempo $[0, t]$. Para cada instancia, tomamos $t = 100000$ y muestreamos $\bar{\lambda}_i \sim Unif(0, 1)$ y definimos $\lambda_i = \frac{\bar{\lambda}_i}{\sum_{j \in \mathcal{T}} \bar{\lambda}_j}$, $\mu_i \sim Unif(0.01, 4)$ y $r_{ij} \sim 6 \cdot Unif(0, 1)^2$. Cada punto del en el eje horizontal del gráfico representa el muestreo de una instancia $\mathcal{I}$. Para cada experimento muestreamos 100 instancias y calculamos los valores de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$, $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$, $\text{OMN}(\mathcal{I}, t)$ y $\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$. Normalizamos los valores de $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$, $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$ y $\text{OMN}(\mathcal{I}, t)$ dividiéndolos por $\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$ y ordenamos las instancias de acuerdo a $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)/\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$, de mayor a menor. Repetimos el experimento para $|\mathcal{T}| = 3$, $|\mathcal{T}| = 6$ y $|\mathcal{T}| = 10$.

Los resultados muestran que $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$ es una cota inferior para $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$ en todos los casos lo que sugiere que $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$ es una cota inferior para la política simple asociada a la instancia $\mathcal{I}$ incluso cuando no se cumplen las condiciones de abandono homogéneo.

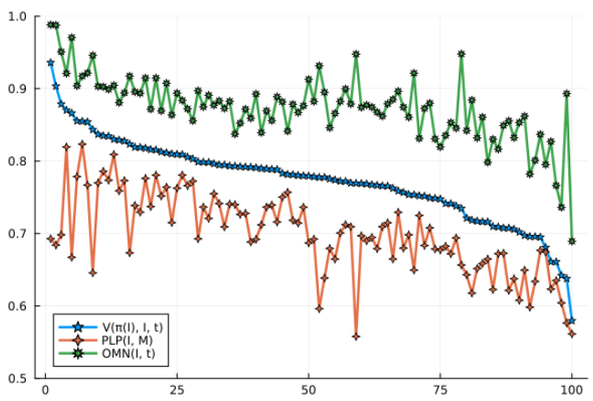


Fig. 2. Comparación enre $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$, $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$, $\text{OMN}(\mathcal{I}, t)$ y $\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$ para 100 simulaciones con $|\mathcal{T}| = 3$ y $t = 100000$.

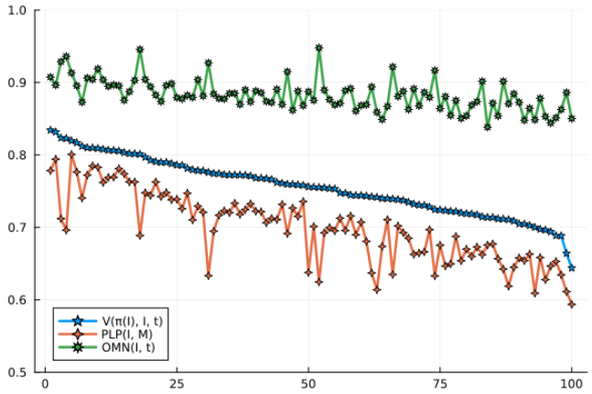


Fig. 3. Comparación enre $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$, $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$, $\text{OMN}(\mathcal{I}, t)$ y $\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$ para 100 simulaciones con $|\mathcal{T}| = 6$ y $t = 100000$.

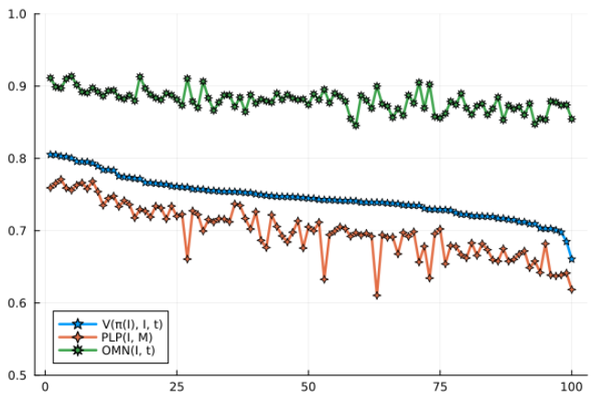


Fig. 4. Comparación enre $\text{LP}^{\text{ALG}}(\mathcal{I}, \mathcal{M})$, $V(\text{ALG}(\mathcal{I}), \mathcal{I}, t)$, $\text{OMN}(\mathcal{I}, t)$ y $\text{LP}^{\text{OMN}}(\mathcal{I})$ para 100 simulaciones con $|\mathcal{T}| = 10$ y $t = 100000$.

REFERENCES

[1] Natalie Collina, Nicole Immorlica, Kevin Leyton-Brown, Brendan Lucier, and Neil Newman. Dynamic weighted matching with heterogeneous arrival and departure rates. In *Web and Internet Economics: 16th International Conference, WINE 2020, Beijing, China, December 7–11, 2020, Proceedings 16*, pages 17–30. Springer, 2020.

[2] Ali Aouad and Ömer Sarıtaç. Dynamic stochastic matching under limited time. *Operations Research*, 70(4):2349–2383, 2022.

[3] Kristen Kessel, Ali Shameli, Amin Saberi, and David Wajc. The stationary prophet inequality problem. In *Proceedings of the 23rd ACM Conference on Economics and Computation*, pages 243–244, 2022.

[4] Neel Patel and David Wajc. Combinatorial stationary prophet inequalities. In *Proceedings of the 2024 Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*, pages 4605–4630. SIAM, 2024.

An adaptive algorithm for the polyhedral-outer approximation of convex functions

1st Nicolás I. Boyardi Alache
Department of Industries
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
nicolas.boyardi@usm.cl

2nd Pablo Escalona
Department of Industries
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
pablo.escalona@usm.cl

3rd Alejandro Angulo
Department of Electrical Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
Alejandro.Angulo@usm.cl

***Abstract*—In this work, the *Dual-Adaptive Supporting Hyperplane* algorithm, *D-ASHA* in short, is presented. For given $n \in \mathbb{N}$, a bounded polyhedra $\mathcal{D} \subseteq \mathbb{R}^n$, a convex and differentiable function $f : \mathcal{D} \to \mathbb{R}$, and an error threshold $\varepsilon > 0$, *D-ASHA* greedily builds a finite set of points $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{D}$ such that, at each $\mathrm{x} \in \mathcal{D}$, the function $f_{\mathcal{C}}(\mathrm{x})$, defined as the point-wise supremum over the first-order Taylor expansions of f at points y in $\mathcal{C}$, is not over ε units away of $f(\mathrm{x})$. The epigraph of $f_{\mathcal{C}}$ has two important properties. The first one is that it is a polyhedra. The second property is that it contains the epigraph of f. Thus, $f_{\mathcal{C}}$ is a polyhedral outer approximation of f.**

This algorithm serves its purpose as a tool for creating linear relaxations of convex optimizations problems. In particular, any non-linear convex function that is part of a constraint or the objective function may be substituted by its polyhedral-outer approximation $f_{\mathcal{C}}$ built by *D-ASHA* as follows. One must add one continuous variable and $|\mathcal{C}|$ linear inequalities to the problem, one for each supporting hyperplane defined by the points of $\mathcal{C}$, and replace f by this new variable.

***Index Terms*—outer approximation, convex functions, polyhedral approximation**

I. Introduction

Solving a mixed-integer non linear programming (MINLP) model, or a NLP in general, usually is no easy task. Non-convex problems are even more hard to deal with, so in this work the attention is reduced to convex MINLP. There are plenty of approaches to deal with these kind of problems. Amongst them, those based on linearization tend to be the most effective ones [1].

One kind of linearization is the one observed, for example, in the works of [4], [2], amongst others. The common factor in those works is the desire to solve a Convex MINLP where the main difficulty arises from some convex function f that defines either a constraint or a term in the objective function. The solution approach is to construct an outer approximation of the function through supporting hyperplanes. The substitution of f is realized by an addition of a finite set of supporting hyperplanes. The outer property of the approximation is crucial, as the problem with the outer approximation defines a relaxation of the original optimization problem, letting construct tight bounds if the approximation is good enough.

As far as the author is concerned, the problem of generating a finite set of supporting hyperplanes representing the outer approximation of n-dimensional convex functions has not been addressed yet. By far, the best attempt is in the works of [2], where they state an explicit and efficient way to construct those hyperplanes in the 1-dimensional case. Sadly, the construction does not give insight on how to generalize this algorithm to higher dimension. Moreover, it is fundamentally based on the *well-ordering* property of the real line. Although in other works some 2-dimensional convex functions have been addressed, the outer approximations are built rather heuristically, without any measure on how efficient or of quality, if any, they are.

Thus, it is of great importance to have know how to efficiently and reliably compute the finite set of supporting hyperplanes that represent the outer approximation of n-dimensional convex functions f. This works addresses this question with the creation of the *Dual-Adaptive Supporting Hyperplane Approximation* algorithm (*D-ASHA* in short). This 1st-order algorithm (requiring only information up to the first derivatives of f) has shown to be very fast in the computations of very good quality supporting hyperplanes. The computation times are as low as minutes, and the size of the set of hyperplanes tend to be as small as possible. This is achieved through an optimization problem that guarantees that the global difference between the function and the outer approximation is monotonically decreasing, up to any given threshold $\varepsilon > 0$.

The rest of this work is organized as follows. In II the optimization problem behind the iterative creation of each hyperplane is addressed. Next, in III is discussed how the algorithm is implemented adaptively, and why is it dual. Then, a brief discussion on the benchmarking of the algorithm is hold in IV. This section is fully avalaible in the complete work. Finally, in V some final remarks are made around the importance and usefulness of this work.

II. NSHA Algorithm

The *Naive Supporting Hyperplane Approximation* Algorithm, *NSHA* in short, successively adds supporting hyperplanes given by the first-order Taylor approximation on the point that maximizes the point-wise error between f and its actual outer approximation. Due to the outer approximation being a polyhedral approximation too (that is, its epigraph is polyhedral), the point that characterizes the hyperplane satisfy being some vertex of the epigraph of the outer approximation projected back to the domain of f.

More precisely, given a convex function $f : \mathcal{D} \subseteq \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ over an n-dimensional bounded polyhedra $\mathcal{D}$, one defines its polyhedral approximation with respect to the (finite) set of *cuts* $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{D}$ as

$$f_{\mathcal{C}}(\mathbf{x}) := \sup_{\mathbf{y} \in \mathcal{C}} f_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}), \qquad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{D},$$

where $f_{\mathbf{y}}$ is the first-order Taylor approximation of f at $\mathbf{y} \in \mathcal{C}$. The set $\mathcal{C}$ represents every supporting hyperplane that form part of the outer approximation of f thus far. Then, the question of which new *cut* to add to the set is answered as follows. The difference between f and its outer approximation $f_{\mathcal{C}}$ will be small for values of $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$ near some point of $\mathcal{C}$. Conversely, for points far away from any *cut* in $\mathcal{C}$ will yield high difference between the function and its approximation. So, it is natural to seek for the point that maximizes the error over the domain $\mathcal{D}$. This problem is hard, as it is neither conver nor concave. But it can be shown that the optimum, that is, the point that maximizes the difference between f and $f_{\mathcal{C}}$ over $\mathcal{D}$ is the projection of some vertex of the epigraph of $f_{\mathcal{C}}$ onto $\mathcal{D}$. In figure 1 shows a heatmap of the absolute difference between f and $f_{\mathcal{C}}$, in the 2-dimensional case, showing the former phenomenom described.

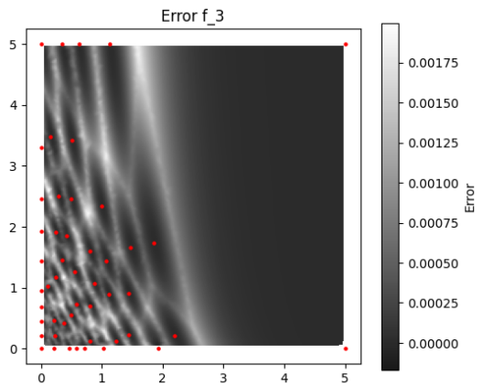


Fig. 1. Heatmap of the absolute difference between a 2-dimensional convex function f_3 and its outter approximation $f_3_{\mathcal{C}}$. The elements of $\mathcal{C}$ are highlighted as red dots. Clearly, the maximum difference is achieved at the vertex of one of the polyhedra formed by the lighter lines.

In general, the main result in this section is that the task of finding the best supporting hyperplane to improve the quality of the actual outer approximation is reduced to finding the finite set of vertices of the epigraph of $f_{\mathcal{C}}$, then projecting them back onto the domain, and finding the worst one in terms of the error of approximation. That is, the problem of finding the worse-error point in the domain:

$$\max_{\mathbf{x} \in \mathcal{D}} f(\mathbf{x}) - f_{\mathcal{C}}(\mathbf{x}),$$

is equivalent to:

$$\max_{(\mathbf{x},z) \in ext(epi(f_{\mathcal{C}}|_{\mathcal{D}}))} f(\mathbf{x}) - z,$$

where $ext(\cdot)$ denotes the extreme points, or vertices, of any convex set. Due to $\mathcal{D}$ being a bounded polyhedra and $\mathcal{C}$ finite, it is shown that $ext(epi(f_{\mathcal{C}}|_{\mathcal{D}}))$ is also finite, so the original maximum-error problem is equivalent to one with a finite set of posible solutions.

Finally, the *NSHA* algorithm is stated as follows. Starting with the vertices of $\mathcal{D}$ as the initial set of *cuts*, i.e. $\mathcal{C}_0 := ext(\mathcal{D})$, one must iterate adding *cuts* to $\mathcal{C}$, solving the worst-error problem (which involve enumerating the vertices of the polyhedra $epi(f_{\mathcal{C}})$), until the maximum difference achieves a value under some fixed threshold $\varepsilon > 0$. This method is shown to converge in a finite number of steps.

III. The adaptiveness and duality of the D-ASHA algorithm

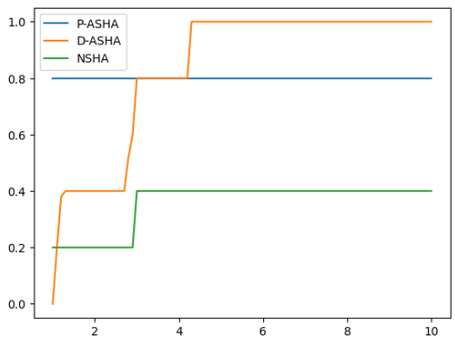
Despite the functionality of the convergence of *NSHA*, it has a scalability problem. When there are more than 600 *cuts*, the algorithm starts to slow down considerably. This is due to the vertex enumeration routine in each iteration. Thus, the idea of an adaptive algorithm is considered, in the same fashion as in the solution of partial differential equations through adaptive meshes.

The *D-ASHA* algorithm first creates a adaptive triangulation of the domain as follows. Given the actual set of cuts $\mathcal{C}$, the triangulation to form has to be made up with full-dimensional simplices such that every vertex of any simplex is a *cut* from the set $\mathcal{C}$. Then, the algorithm solves the problem of finding the worst-error point that maximizes the difference between f and $f_{\mathcal{C}}$ locally, that is, considering only local information of the simplex. In the end, the local problem looks like the one used in *NSHA* but constraining the optima to lay inside the current simplex, and also to consider only *neighboring cuts*, that is, considering just enough *cuts* to well represent the approximation near the simplex and not every element in $\mathcal{C}$. There is no last word said about how to consider this neighbourhoods yet, but numerical experiments have shown that, by far, the best way to do it is by considering *dual cuts* neighbours. That is, considering neighbours of the points $\nabla f(\mathcal{C}) := \{\mathbf{y}^* | \ \mathbf{y}^* = \nabla f(\mathbf{y}), \ \forall \mathbf{y} \in \mathcal{C}\}$, in the dual space. Independently from the last choice, the local maximal errors are shown to overestimate the true local maximal errors (considering every element in $\mathcal{C}$). This permits to label every simplex as follows. If the local maximal error is greater than ε, then the simplex is **marked**. If not, it is **not marked**. The union of marked simplices defines the subregion where the pointwise error is not small enough, and one must keep refining it. This is done re-triangulating this subset of the domain, which is posible because said set, as a finite union of simplices, is a union of (possibly disjoint) polygons. This adaptive triangulation is just a special case of a *constrained Delaunay triangulation*, for which plenty of libraries let one construct this desired set. Finally, one just keep solving the local problems until all simplices are not marked, which would imply the outer approximation has a global error not worse than $\varepsilon > 0$, or until a time or iteration budget is spent, in which case the error bound would not necessarily apply.

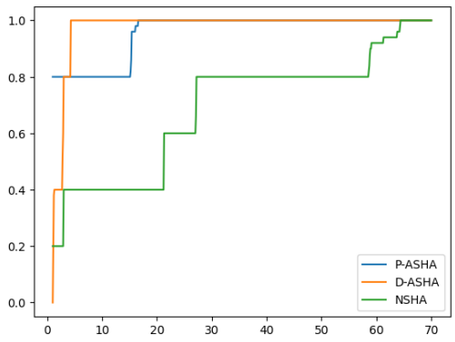
IV. Experiments

The experiments consisted in computing the approximations of five convex functions. Amongst them, there are both really simple functions and highly non-linear functions (as the ones used in [5] and [4], which inspired this work). These approximations are carried out with 3 algorithms, that is, through *NSHA*, *P-ASHA* (a primal variant of D-ASHA) and *D-ASHA*. CPU time and cardinality of the generated *cuts* for each algorithm are measured and considered for case analysis. Finally, a global analysis (that considers every case) is done using *performance profiles* [3], a metric depending on a parameter $\tau \geq 1$ which, for a given random case from the set of cases considered (5 for this work), measure the probability that a particular algorithm will be not greater than τ times the best computation time for said case.

The full details of the experiments and their results are on the original work, pending of publication. In (2) it can be seen the global performance of the 3 algorithms ran for this experiment, through the the performance profiles.



(a)



(b)

Fig. 2. Performance profiles of *NSHA*, P-ASHA and *D-ASHA*, for $\tau \in [1, 10]$ (a) and $\tau \in [1, 70]$ (b).

V. Conclusions

As the experiments show, *D-ASHA* is a really fast and efficient algorithm, robust for any given convex function to approximate.

Although there is no proof of convergence (in a finite number of iterations) of *D-ASHA*, experiments shows no indication it would ever not converge, as it always converges by the error threshold criteria in almost minimal time. The computation times reported are always very low for *D-ASHA*, winning over the *NSHA* algorithm always. The very few cases when is not the case, is so by very few seconds. Now, the fact that the latter does in fact converge, it may indicate that so does *ASHA*.

As a final remark, the implementation of this approximation in actual optimization problems can be done as shown next:

$$(P)\ \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \quad s.t.\ g(\mathbf{x}) \leq 0. \quad \approx \quad (P_{\mathcal{C}})\ \min_{\mathbf{x},z} z \quad s.t.\ f_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) \leq z, \quad \forall \mathbf{y} \in \mathcal{C}_f, \quad g_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) \leq 0, \quad \forall \mathbf{y} \in \mathcal{C}_g.$$

where both f and g are convex functions, and $\mathcal{C}_f$ and $\mathcal{C}_g$ are the respective sets of *cuts* computed by the *D-ASHA* algorithm. That is, one have to add $|C_f|$ and $|C_g|$ linear inequalities in order to substitute functions f and g in problem (P).

References

[1] W. Melo, M. Fampa, and F. Raupp, "Two linear approximation algorithms for convex mixed integer nonlinear programming," Annals of Operations Research, vol. 316, no. 2, pp. 1471-1491, Jul. 2020, doi: https://doi.org/10.1007/s10479-020-03722-5.

[2] C.-H. Hsieh, "On solving robust log-optimal portfolio: A supporting hyperplane approximation approach," European Journal of Operational Research, vol. 313, no. 3, pp. 1129-1139, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.09.040.

[3] E. D. Dolan and J. J. Moré, "Benchmarking optimization software with performance profiles," Mathematical Programming, vol. 91, no. 2, pp. 201-213, Jan. 2002, doi: https://doi.org/10.1007/s101070100263.

[4] P. Escalona, A. Angulo, Luce Brotcorne, B. Fortz, and P. Tapia, "Distribution network design with shortage costs," unpublished.

[5] P. Escalona, A. Angulo, Luce Brotcorne, B. Fortz, and P. Tapia, "Fill-rate service level constrained distribution network design," International Transactions in Operational Research, vol. 31, no. 1, pp. 5-28, Jun. 2023, doi: https://doi.org/10.1111/itor.13331.

Automatic Construction of Interpretable Heuristics for the Polynomial Robust Knapsack Problem

1st Carlos Rey
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
crey@ubiobio.cl

2nd Carlos Contreras-Bolton
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción
Concepción, Chile
carlos.contreras.b@udec.cl

3rd Moises Silva-Muñoz
Departamento de Ingeniería Informática
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
moises.silva@usach.cl

4th Víctor Parada
Departamento de Ingeniería Informática
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
victor.parada@usach.cl

***Abstract*— This work presents heuristics for complex combinatorial optimization problems using Genetic Programming (GP). This study focuses on focus on the Polynomial Robust Knapsack Problem (PRKP), a recent generalization of the classical Knapsack Problem that accounts for cost uncertainty and nonlinear synergies among item subsets. We propose a Genetic Programming-based framework that evolves algorithms represented as executable syntax trees. These trees are composed of problem-specific operators (e.g., item selection and removal strategies) and logic-based structural components. The proposed approach enables the discovery of adaptive and interpretable algorithms, which evolved based on their performance on PRKP instances. Preliminary insights suggest that this strategy holds promise as a scalable and automated alternative to manually designed heuristics.**

Keywords—Genetic Programming, Heuristics, Polynomial Robust Knapsack Problem

I. Introduction

Many real-world decision-making problems involve selecting a subset of items under limited resources, often facing both uncertain costs and nonlinear interactions among selected items. Classical models, such as the 0-1 Knapsack Problem (KP), fail to capture these dimensions. To address these limitations, the Polynomial Robust Knapsack Problem (PRKP) was proposed in [1], a novel formulation that simultaneously integrates robust optimization, where item costs are uncertain within specified bounds, and polynomial utility functions, which account for synergies between multiple items. The resulting problem is significantly harder than traditional KP or its quadratic extension (QKP). Solving large-scale PRKP instances with exact methods becomes computationally prohibitive.

In parallel, the field of algorithm generation has explored techniques to construct solvers automatically. One promising direction is the use of Genetic Programming (GP) to evolve algorithms tailored to a given class of problems. In recent work on automatic clustering, GP was successfully employed to generate entire metaheuristics, combining construction, refinement, and logic rules into single executable programs [2].

Inspired by that approach, we aim to bridge both contributions: we propose a GP-based framework for automatic generation of PRKP-solving heuristics. Each evolved algorithm is evaluated based on its ability to solve PRKP instances efficiently and robustly. The resulting algorithms can be interpreted, modified, and reused as an appealing methodology for designing solvers in complex optimization domains.

II. Methodology: Genetic Programming Applied to the PRKP

The proposed methodology is based on standard Genetic Programming (GP) [3, 4], using a classical representation in the form of syntax trees. Each individual in the evolutionary population corresponds to a complete algorithm designed to solve instances of the PRKP. Unlike traditional approaches that build solutions directly, our goal is to evolve entire algorithmic structures composed of elementary operators and decision logic, enabling a flexible and dynamic exploration of the solution space.

Each algorithm is evaluated by executing it on one or more instances of the PRKP. Its quality is assessed based on the robust objective value it achieves under worst-case cost scenarios defined by the ɣ-uncertainty model. Feasibility with respect to knapsack capacity is strictly enforced, and computational efficiency is also considered. As a result, algorithms that yield high-quality, robust, and feasible solutions in a reasonable amount of time are favored.

The representation of each algorithm follows a hierarchical structure, where internal nodes correspond to logical and control functions, and leaves consist of terminal operators that manipulate the candidate solution. The available control functions include standard decision and iteration structures such as "If", "If-Then-Else", "While", and "ForEach", along with logical connectors like "And", "Or", and "Not". These allow the trees to encode rich algorithmic behaviors composed of simple, interpretable elements.

The terminal operators are divided into constructive, refinement, and local search categories. Constructive operators are responsible for adding items to the knapsack using different criteria. These include "addBestItem", "addHeaviestItem", "addLowestCostBenefitRatioItem", "addLowestCostItem", "addMaxCostItem", "addMaxPolynomialItem", "addMaxProfitItem", "addMaxResidualBenefitItem", "addSmallestItem", and "addWorstRatioItem".

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Refinement operators include "removeBestRatioItem", "removeHeaviestItem", "removeHighestCostItem", "removeMaxPolynomialImpactItem", "removeMinCostImpactItem", "removeMinProfitItem", "removeMinResidualBenefitItem", and "removeWorstCostBenefitRatioItem". Additionally, two terminal operators enable local improvement: "localSearch", which performs neighborhood-based modifications through item insertion, removal, or swapping; and "terminalCPLEX", which invokes an exact optimization step using CPLEX to refine the current solution.

The evolutionary process, Figure 1, begins with a randomly generated population of syntax trees, each constrained by a maximum initial depth. As evolution proceeds over multiple generations, tournament selection is used to retain the most promising individuals. Crossover and mutation operators are applied to introduce variation. Mutation may act by replacing one terminal with another, altering a subtree, or injecting new logical patterns. To preserve interpretability and avoid excessive code growth, size control mechanisms are incorporated.

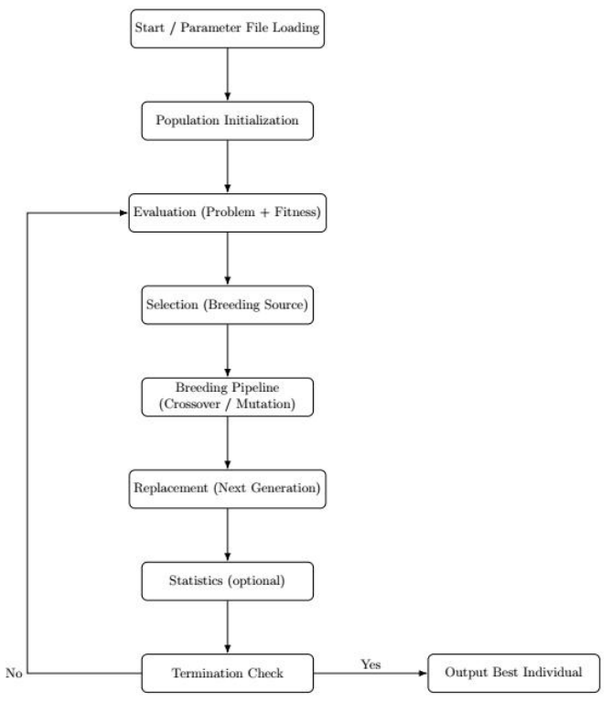


Fig. 1. Evolutionary Process in ECJ

This approach enables the automatic discovery of interpretable heuristics tailored to the PRKP, combining robustness against uncertainty with sensitivity to nonlinear synergies. The resulting algorithms are efficient, flexible, and applicable to real-world scenarios where complexity and robustness must be balanced.

III. Results and Discussion

The problem instances were generated following the methodology proposed by [1], creating instances with sizes ranging from 10 to 100 items. Subsequently, the optimal solutions for all instances were successfully computed using CPLEX 22, ensuring a reliable benchmark for evaluating the performance of the evolved heuristics.

The experimental protocol was conducted on a computer running Ubuntu 22.04, with an Intel Core i9-13900KF processor and 64 GB of RAM. The evolutionary process was implemented using the ECJ 22 framework [5], and the terminal improvement component was developed using CPLEX version 22 as the optimization backend. All experiments were executed in parallel, with the complete evolutionary run requiring a total of 84.6 hours.

In Figure 2, the genetic programming tree implements a conditional heuristic that selects between two strategies based on a logical comparison between improvement and cleanup operations. It first evaluates whether removing low-profit items (removeMinProfitItem) followed by a local search (LocalSearch) yields the same result as adding high-residual-benefit items (AddMaxResidualBenefitItem) along with a terminal operation (Terminal_CLPX). If this condition is met, it iteratively executes (Do_while) a strategy that combines the insertion of high-cost items (AddMaxCostitem) or the removal of items with a poor cost-benefit ratio (removeWorstCostBenefitRatioItem), repeating as long as these actions remain valid. This heuristic shows strong performance, reaching optimal solutions in 95% of the test cases.

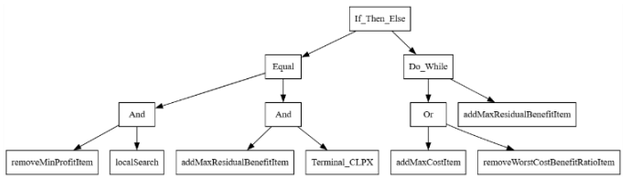


Fig. 2. Best Genetic Programming Individual From Evolution

As future work, we propose integrating reinforcement learning to guide the evolutionary process, allowing individuals to adaptively learn which operators are most effective based on instance features [6]. Additionally, machine learning models could be used to predict instance difficulty or classify problem structures, enabling automatic configuration or selection of heuristics through meta-learning [7]. Hybrid approaches that combine symbolic heuristics evolved via genetic programming with components learned through deep learning also represent a promising direction, aiming to balance interpretability and performance.

Acknowledgment

We appreciate the funding provided by the National Agency for Research and Development (ANID) through the "Subvención a la Instalación en la Academia" Folio 85220108 and Vicerrectoria de Investigación y Postgrado (UBB-VRIP) through the "Proyecto de Investigación Interno 2023": RE2360219. We also thank ANID for its support through the FONDECYT Iniciación Project number 11241132. Finally, the authors would like to extend their gratitude to the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions, which helped improve our work.

REFERENCES

[1] A. Baldo, M. Boffa, L. Cascioli, E. Fadda, C. Lanza, y A. Ravera, «The polynomial robust knapsack problem», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 305, n.º 3, pp. 1424-1434, 2023.

[2] M. Silva-Muñoz, J. Oyarzún, G. Semaan, C. Contreras-Bolton, C. Rey, y V. Parada, «Automatic clustering by automatically generated algorithms», *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 159, p. 111596, nov. 2025, doi: 10.1016/j.engappai.2025.111596.

[3] W. B. Langdon, R. Poli, N. F. McPhee, y J. R. Koza, «Genetic Programming: An Introduction and Tutorial, with a Survey of Techniques and Applications», en *Computational Intelligence: A Compendium*, J. Fulcher y L. C. Jain, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 927-1028. doi: 10.1007/978-3-540-78293-3_22.

[4] V. Parada, *Automatic Generation Of Algorithms*. Boca Raton: CRC Press, 2025. doi: 10.1201/9781003542896.

[5] E. O. Scott y S. Luke, «ECJ at 20: toward a general metaheuristics toolkit», en *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, en GECCO '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, jul. 2019, pp. 1391-1398. doi: 10.1145/3319619.3326865.

[6] Y. Bengio, A. Lodi, y A. Prouvost, «Machine learning for combinatorial optimization: A methodological tour d'horizon», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 290, n.º 2, pp. 405-421, abr. 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2020.07.063.

[7] M. Karimi-Mamaghan, M. Mohammadi, P. Meyer, A. M. Karimi-Mamaghan, y E.-G. Talbi, «Machine learning at the service of meta-heuristics for solving combinatorial optimization problems: A state-of-the-art», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 296, n.º 2, pp. 393-422, ene. 2022, doi: 10.1016/j.ejor.2021.04.032.

Session N°1 – Track N°4

Analytics and Artificial Intelligence

Chair: Carrasco, M. *(Universidad de Los Andes)*
Place: X-103
Time: 10:40 – 11:55

Un Marco Novedoso de Clasificación Basado en Familias para Determinar la Criticidad de Repuestos

Time: 10:40 – 10:55
Authors:

- Inostroza-Leon, M. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
- Rampasso, I. *(Universidad Católica del Norte)*
- Roda, I. *(Politecnico di Milano)*

Mejora de Adherencia a Planificación de Ruteo Usando Machine Learning Basado en Preferencias Pasadas

Time: 11:00 – 11:15
Authors:

- Rubio-Carrasco, T. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Aburto-Lafourcade, L. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Bucarey-López, V. *(Universidad de O'Higgins)*
- Lagos-González, F. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- González, V. *(Simplit S.p.A.)*
- Contreras, I. *(Simplit S.p.A.)*

Agentic Generative AI for Operations Research: From Modeling to Automated Heuristic Design

Time: 11:20 – 11:35
Authors:

- Palk, M. *(Universität Hamburg)*
- Voß, S. *(Universität Hamburg)*

Prostate Cancer Detection in Digitized Images of Core Needle Biopsies

Time: 11:40 – 11:55
Authors:

- Araya, J. *(Universidad de la Frontera)*
- Burgos, M. *(Universidad de la Frontera)*
- Carrasco, M. *(Universidad de Los Andes)*
- Espinoza M. *(Universidad de la Frontera)*

Un marco novedoso de clasificación basado en familias para determinar la criticidad de repuestos

1st Mickael Inostroza-Leon
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
mickael.inostroza@ucn.ce.cl

2nd Francisco J. Tapia-Ubeda
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
francisco.tapia@ucn.cl

3rd Izabela Simon Rampasso
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
izabela.rampasso@ucn.cl

4th Irene Roda
Dipartimento di Ingegneria Gestionale
Politecnico di Milano
Milán, Italia
irene.roda@polimi.it

***Abstract*—La gestión de repuestos es crucial para garantizar la continuidad de las operaciones en entornos industriales con uso intensivo de equipos. Una tarea fundamental, en este ámbito, es la clasificación de repuestos para priorizar la asignación de recursos, lo que condiciona muchos aspectos, entre ellos el dimensionamiento del inventario según su criticidad. Los enfoques tradicionales suelen aplicar un único conjunto de criterios a todo el portafolio de repuestos. Sin embargo, esto puede resultar en una priorización deficiente, lo que genera un menor desempeño organizacional. Este estudio propone un marco que primero categoriza el portafolio de repuestos en familias para luego aplicar conjuntos de criterios de clasificación ajustados a cada familia, posteriormente evalua todas las configuraciones viables a través de indicadores desempeño. Los hallazgos comprueban que el enfoque de clasificación basado en familias supera en la gran mayoría de los casos a las posibles soluciones obtenidas a través de los métodos de clasificación tradicionales. Dada la estructura de la propuesta, es posible garantizar que la asignación de recursos sea siempre mejor o igual de efectiva y efectiva que el enfoque tradicional. El estudio contribuye tanto a la teoría como a la práctica al ofrecer una herramienta flexible de apoyo a la toma de decisiones capaz de abordar la diversidad inherente de los inventarios de repuestos en diferentes contextos industriales.**

***Index Terms*—Gestión de Repuestos, Categorización, Clasificación, Toma de Decisiones Multicriterio, Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones.**

I. Introducción

Las piezas de repuesto (SP, por sus siglas en inglés) son esenciales para garantizar la continuidad operativa, y su gestión inadecuada puede generar mayores costos operativos, riesgos de seguridad e incluso consecuencias ambientales [1], [2]. La gestión de piezas de repuesto (SPM, por sus siglas en inglés), implica diversas decisiones, como la adquisición, el control de inventario y la planificación del mantenimiento, que generalmente buscan maximizar la disponibilidad y mantener la rentabilidad [3], [4], [5], [6]

Una tarea particularmente compleja dentro de la SPM es la clasificación de los SP según su criticidad para facilitar la priorización de recursos [7], [8], [9]. Si bien se han propuesto numerosas herramientas para este propósito [10], [11], [12], [13], [14], la mayoría aplica un conjunto uniforme de criterios a todo el portafolio. Sin embargo, los SP suelen presentar diferencias significativas, desde equipos de alto costo hasta componentes de bajo valor, lo que dificulta la cuantificación de su criticidad mediante un único enfoque [15], [16], [17]. Esta heterogeneidad aumenta el riesgo de clasificación errónea, priorizando potencialmente las partes de bajo impacto o pasando por alto aquellas que son críticas [16], [18], [7], [19]

II. Marco Propuesto

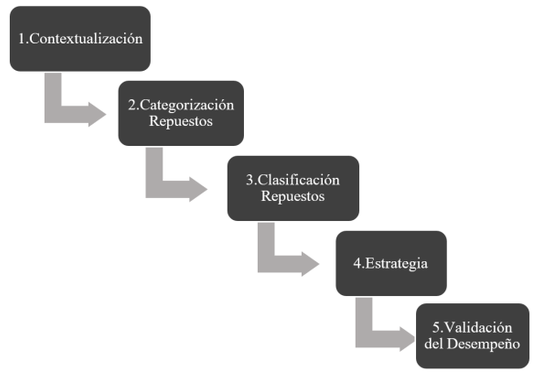


Fig. 1. Marco metodológico para la clasificación de repuestos

El marco metodológico se estructura en cinco pasos principales:

1) Se define el contexto de aplicación, incluyendo su alcance operativo, objetivos (ej., coste, nivel de servicio), supuestos y requisitos de datos.
2) La cartera se clasifica en familias homogéneas según atributos seleccionados mediante técnicas de agrupamiento, lo que garantiza la similitud interna y la distinción externa.
3) Cada familia se clasifica de forma independiente mediante la toma de decisiones multicriterio, donde los

criterios y sus ponderaciones se asignan dinámicamente según su relevancia para cada grupo.

4) Los perfiles de criticidad resultantes respaldan estrategias de inventario diferenciadas por clase, como el ajuste de los niveles de servicio o los periodos de revisión.
5) El desempeño se valida mediante simulación de eventos discretos utilizando múltiples indicadores (ej., coste, disponibilidad, tasa de llenado), lo que permite identificar configuraciones eficientes.

Este enfoque estructurado pero flexible permite una priorización más precisa y un control de inventario adaptativo en diversas carteras de repuestos.

III. Implementación Computacional

Para evaluar la efectividad del marco propuesto, se desarrolló una implementación con datos sintéticos de 1.000 repuestos (en entorno Python con librerías como Panas, NumPy y Scikit-Learn), con características diversas, de las cuales cierto conjunto será atributo para categorizar y criterios para clasificar.

En la etapa de categorización, se probaron múltiples combinaciones de atributos mediante k-means, variando el número de familias de 1 a 5 (asumiendo que el k=1 es el enfoque tradicional). Cada configuración se definió de forma única por su conjunto de atributos y el número de familias resultantes, lo que permitió realizar pruebas exhaustivas con diferentes alternativas estructurales.

La clasificación se realizó de forma independiente para cada familia utilizando todas las combinaciones posibles de 3 o 4 criterios derivados de los atributos restantes. Las ponderaciones de los criterios se calcularon mediante entropía y las clasificaciones se obtuvieron mediante TOPSIS. Esto permite adaptar la evaluación de criticidad a las características específicas de cada familia.

Se asignaron estrategias de inventario con base en la segmentación ABC de las clasificaciones, aplicando una política periódica (R, S). Las piezas más críticas recibieron niveles de servicio más altos y ciclos de revisión más cortos, mientras que las menos críticas recibieron parámetros más flexibles.

Para validar el desempeño de la implementación, se realizó una simulación de eventos discretos con un horizonte temporal de 72 meses. Los componentes del coste incluyeron pedidos, stock de ciclo, stock de seguridad y pedidos pendientes. La simulación siguió una lógica de inventario estándar, con la satisfacción de la demanda, la acumulación de pedidos pendientes y las acciones de reabastecimiento modeladas a lo largo del tiempo Fig.2.

IV. Validación del Desempeño

Basado en la literatura, se procede a determinar con los resultados de la simulación la disponibilidad, vista desde tres enfoques; el Fill Rate (FR), Cycle Service Level (CSL) y Availability (Av), utilizando las siguientes fórmulas:

$$FR = \frac{\text{Demanda atendida desde el inventario}}{\text{Demanda total}} \tag{1}$$

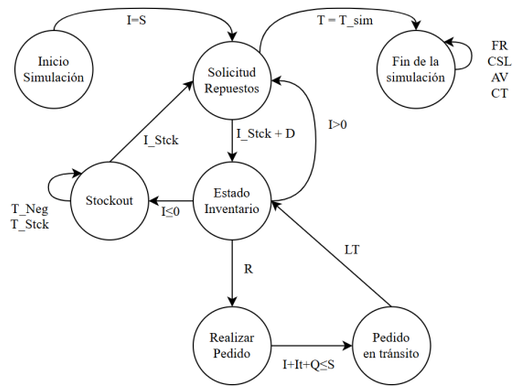


Fig. 2. Marco de clasificación basado en la familia

$$CSL = \frac{\text{Número de ciclos sin ruptura de stock}}{\text{Número total de ciclos de inventario}} \tag{2}$$

$$AV = \frac{\text{Tiempo con inventario disponible}}{\text{Tiempo total}} \tag{3}$$

Como medida de desempeño adicional y no menos importante, se procede a determinar los costos totales de inventario, a partir de la definición de los siguientes parámetros:

- HC: Costo de mantenimiento unitario.
- OC: Costo de pedido (ordering cost).
- PC: Costo unitario de penalización por faltantes.
- d: Demanda promedio.
- σ: Desviación estándar de la demanda.
- R: Periodo de revisión.
- L: Tiempo de aprovisionamiento.
- $1-\alpha$: Probabilidad de no ruptura de stock.
- $Z_{1-\alpha}$: Cuantil de la normal estándar a $(1-\alpha)$.
- $\phi(Z)$: Función de densidad de probabilidad de la normal estándar evaluada en Z.

A partir de los siguientes parámetros, se formula el costo total de inventario a partir de la siguiente expresión:

$$TC = \frac{OC}{R} + \frac{HC\,d\,R}{2} + HC\,Z_{1-\alpha}\,\sigma\sqrt{R+L} + PC\,\sigma\sqrt{R+L}\,\phi\big(Z_{1-\alpha}\big) \tag{4}$$

V. Resultados y Conclusiones

La evaluación confirma que la clasificación basada en familias mejora significativamente el rendimiento en comparación con los enfoques tradicionales. Como se muestra en la Tabla 1, que presenta los resultados de minimización de costos para la instancia 1, la aplicación de la categorización y criterios personalizados mejora el desempeño en base a dicho indicador, y así mismo se réplica en los demás indicadores.

Siguiendo con los resultados, se procede a efectuar un analisis multiobjetivo, considerando dos indicadores de desempeño, costo total de inventario y fill rate, de lo cúal como se puede ver en a Figura 3, muestra el frente de Pareto para la Instancia 15, mostrando que casi todas las soluciones eficientes

TABLE I
COMPARACIÓN DE CONFIGURACIONES SEGÚN k

k	Attributes	Criteria for Family	TC	FR	CSL	Av
1	—	F1:[C1,C8,C5]	8,271,E+10	99,900 %	100,000 %	99,681 %
2	C4	F1:[C1,C8,C5]; F2:[C1,C8,C5]	8,265,E+10	99,905 %	100,000 %	99,730 %
3	C4	F1:[C1,C8,C5]; F2:[C1,C8,C5]; F3:[C1,C8,C5]	8,259,E+10	99,917 %	100,000 %	99,722 %
4	C4	F1:[C1,C8,C5]; F2:[C1,C8,C5]; F3:[C1,C8,C5]; F4:[C1,C8,C5]	8,253,E+10	99,907 %	99,998 %	99,700 %
5	C4	F1:[C1,C8,C5]; F2:[C1,C8,C5]; F3:[C1,C8,C5]; F4:[C1,C8,C5]; F5:[C1,C8,C5]	8,259,E+10	99,917 %	100,000 %	99,742 %

surgen de configuraciones basadas en familias, mientras que el esquema tradicional contribuye de forma casi nula.

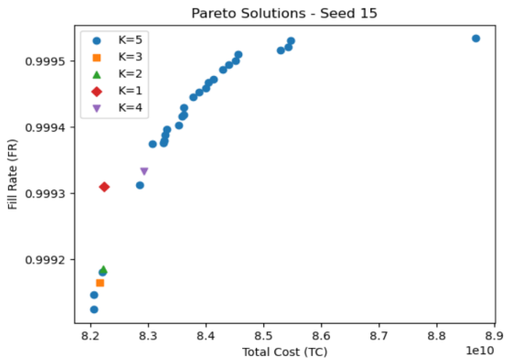


Fig. 3. Grafo de eventos de repuestos

Esta tendencia se mantiene en las 30 instancias evaluadas. Como se resume en el extracto de la Tabla 2 de eficiencia, solo el 1,91% de las soluciones eficientes provinieron de la clasificación tradicional (k=1), mientras que más del 89% resultaron de configuraciones con familias categorizadas y criterios diferenciados. Cabe destacar que la mayoría de estas soluciones eficientes se lograron con k=4 o k=5, lo que demuestra que una segmentación moderada ofrece el mejor equilibrio entre rendimiento y complejidad.

Estos hallazgos confirman la efectividad del marco propuesto. Al considerar la heterogeneidad mediante la categorización y permitir una priorización personalizada, la metodología mejora la calidad de las decisiones y la eficiencia operativa. Para las investigaciones futuras es importante seguir explorando la validación en situaciones reales.

TABLE II
ANÁLISIS DE PUNTOS EFICIENTES SEGÚN CADA INSTANCIA

Instancia	N° Soluciones Eficientes	N°Soluc. Eficie con Conjunto criterios ind	%	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
1	31	25	80.65	1	2	0	8	20
2	19	18	94.74	0	2	9	2	6
3	15	11	73.33	1	1	1	11	1
4	19	18	94.74	1	1	2	7	8
5	40	39	97.50	0	1	4	2	33
…	…	…	…	…	…	…	…	…
30	20	17	85.00	1	0	1	1	17
TOTAL	**732**	**654**	**89.35**	**14**	**35**	**44**	**155**	**484**

REFERENCES

[1] W. J. Kennedy, J. W. Patterson, and L. D. Fredendall, "An overview of recent literature on spare parts inventories," *International Journal of Production Economics*, vol. 76, pp. 201–215, 2002.

[2] J. Stoll, R. Kopf, J. Schneider, and G. Lanza, "Criticality analysis of spare parts management: a multi-criteria classification regarding a cross-plant central warehouse strategy," *Production Engineering*, vol. 9, pp. 225–235, 4 2015.

[3] O. Duran, I. Roda, and M. Macchi, "Linking the spare parts management with the total costs of ownership: An agenda for future research," *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, pp. 991–1002, 2016.

[4] Q. Hu, J. E. Boylan, H. Chen, and A. Labib, "Or in spare parts management: A review," *European Journal of Operational Research*, vol. 266, pp. 395–414, 2018.

[5] L. R. Muniz, S. V. Conceição, L. F. Rodrigues, J. F. de Freitas Almeida, and T. B. Affonso, "Spare parts inventory management: a new hybrid approach," *International Journal of Logistics Management*, vol. 32, pp. 40–67, 2021.

[6] W. D. Rustenburg, G. J. van Houtum, and W. H. Zijm, "Spare parts management at complex technology-based organizations: an agenda for research," *International Journal of Production Economics*, vol. 71, pp. 177–193, 2001.

[7] I. Roda, M. Macchi, L. Fumagalli, and P. Viveros, "A review of multi-criteria classification of spare parts: From literature analysis to industrial evidence," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 25, pp. 528–549, 2014.

[8] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda, I. Roda, M. Macchi, and O. Durán, "Modelling and solving spare parts supply chain network design problems," *International Journal of Production Research*, vol. 58, pp. 5299–5319, 9 2020.

[9] S. Wagner and E. Lindemann, "A case study-based analysis of spare parts management in the engineering industry," *Production Planning & Control*, vol. 19, pp. 397–407, 6 2008.

[10] S. Boroushaki, "Entropy-based weights for multicriteria spatial decision-making," *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*, pp. 168–187, 2017.

[11] B. E. Flores, D. L. Olson, and V. K. Dorai, "Management of multicriteria inventory classification," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 16, pp. 71–82, 1992.

[12] B. Pandya and H. Thakkar, "A review on inventory management control techniques: Abc-xyz analysis," *REST Journal on Emerging trends in Modelling and Manufacturing*, vol. 2, p. 2016 (datos no claros), 2016.

[13] T. Šarić, K. Šimunović, D. Pezer, and G. Šimunović, "Inventory classification using multi–criteria abc analysis, neural networks and cluster analysis," *Technical Gazette*, vol. 21, 2014.

[14] H.-H. H. H. Wu and Y. N. Y.-N. Tsai, "A dematel method to evaluate the causal relations among the criteria in auto spare parts industry," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 218, pp. 2334–2342, 2011.

[15] P. P. Gajpal, L. S. Ganesh, and C. Rajendran, "Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process," *International Journal of Production Economics*, vol. 35, p. 293 – 297, 1994.

[16] S. Miranda, I. Roda, M. Macchi, and G. Montera, "A criticality-driven methodology for the selection of spare parts stock management policies: the case of a beverage industry company," in *Proceedings of XIX Summer School "Francesco Turco"*, pp. 1–6, 2014.

[17] A. Molenaers, H. Baets, L. Pintelon, and G. Waeyenbergh, "Criticality classification of spare parts: A case study," *International Journal of Production Economics*, vol. 140, pp. 570–578, 12 2012.

[18] E. Porras and R. Dekker, "An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods," *European Journal of Operational Research*, vol. 184, 2008.

[19] S. P. Sarmah and U. C. Moharana, "Multi-criteria classification of spare parts inventories - a web based approach," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 21, p. 456 – 477, 2015.

MEJORA DE ADHERENCIA A PLANIFICACIÓN DE RUTEO USANDO MACHINE LEARNING BASADO EN PREFERENCIAS PASADAS

Tomás Rubio Carrasco
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
torubio@alumnos.uai.cl

Luis Aburto Lafourcade
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
luis.aburto@uai.cl

Víctor Bucarey López
Instituto de Ciencias de la Ingeniería
Universidad de O'Higgins
Rancagua, Chile
victor.bucarey@uoh.cl

Felipe Lagos González
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
felipe.lagos@uai.cl

Víctor González
Simplit S.p.A.
Santiago, Chile
victor.gonzalez@simplit-solutions.com

Ignacio Contreras
Simplit S.p.A.
Santiago, Chile
ignacio.contreras@simplit-solutions.com

***Resumen*—La planificación de rutas en la heurística de SimpliRoute muestra discrepancias respecto a la ejecución real de los conductores, reflejando baja adherencia debido a estimaciones incorrectas de costos. Se revisa la literatura sobre VRP, adherencia y aprendizaje de preferencias, se definen objetivos y se describe la metodología basada en CRISP-DM.**

Los modelos líderes de regresión fueron XGBoost, con MAPE de 83,21 % y 90,94 %. El aprendizaje de preferencias mediante *Multilayer Perceptron* mejoró la adherencia promedio en clientes agrupados por comunas (13,71 % a 20,53 %) frente a la heurística SimpliRoute, mostrando que la segmentación por comunas proporciona mayores beneficios.

***Index Terms*—machine learning, VRP, adherencia, preferencias**

I. Introducción

I-A. Vehicle Routing Problem (VRP)

El *VRP* es un problema clásico de optimización combinatoria que busca determinar un conjunto óptimo de rutas para satisfacer la demanda de clientes [2], [3]. Aunque los métodos exactos garantizan soluciones óptimas, su costo computacional resulta elevado, motivando el uso de heurísticas y metaheurísticas que entregan soluciones de buena calidad en menor tiempo [4], [5]. Existen múltiples variantes del VRP —como VRPPD, VRPTW, CVRP o VRPMT— que se adaptan a distintos requerimientos operativos [6].

I-B. Problema

SimpliRoute enfrenta actualmente discrepancias entre las rutas planificadas y las efectivamente realizadas por los conductores, reflejadas en desviaciones de tiempo, distancia y orden de visitas. Esto sugiere que las estimaciones de costo y tiempo del algoritmo no capturan adecuadamente las condiciones reales ni las preferencias de los usuarios. Según estudios previos, los conductores tienden a desviarse por razones personales o de confianza en la planificación [7].

El principal desafío consiste en definir y medir la *adherencia al ruteo*, identificando las variables que la determinan y desarrollando modelos que aprendan de las decisiones humanas. Actualmente, la empresa carece de etiquetas o métricas para clasificar las rutas según su adherencia, lo que dificulta mejorar sus modelos de optimización. Abordar este problema permitiría ajustar los parámetros del VRP e incrementar la satisfacción del cliente y la competitividad de SimpliRoute.

II. Estado del Arte

II-A. Problema del Ruteo de Vehículos (VRP)

El *Vehicle Routing Problem* (VRP) es una extensión del *Travelling Salesman Problem* (TSP) [8], formulado matemáticamente por primera vez en [9] para minimizar distancias recorridas por múltiples vehículos. Desde entonces, ha evolucionado hacia variantes más realistas, como el *Capacitated VRP* (CVRP) y modelos multiobjetivo que integran restricciones temporales, ambientales y de inventario [10], [11]. Dado su carácter NP-hard, el uso de métodos exactos resulta limitado, motivando la adopción de heurísticas, metaheurísticas y enfoques híbridos [11], [12].

II-B. Modelos Afines a la Adherencia en Ruta

La adherencia al ruteo analiza el grado de coincidencia entre las rutas planificadas y las realmente ejecutadas. En [13], solo el 61 % de los trayectos planificados coincidió con las rutas reales, evidenciando la influencia de factores humanos. Otros trabajos, como [14], modelan la *desviación* mediante métricas de distancia y regresiones predictivas con desempeño moderado ($R^2 < 0{,}6$). De forma complementaria, [15] y [16] incorporan medidas de desviación y aprendizaje automático

(SVM, regresión lineal) para cuantificar diferencias entre rutas, aunque sin abordar directamente la adherencia en VRP.

II-C. Modelos Basados en Preferencias de Ruteo

El aprendizaje de preferencias busca capturar el comportamiento histórico de los conductores para mejorar la planificación del ruteo [17]. Entre los enfoques más utilizados destacan:

- **Modelos de Markov:** Utilizados para predecir trayectorias a partir de secuencias históricas de GPS, alcanzando precisiones cercanas al 90 % [18]–[21].
- **Redes Neuronales:** Modelos como PathRank y LSTM aprenden patrones de rutas y preferencias de conducción, logrando mejoras marginales sobre los modelos markovianos [22]–[24].
- **Frameworks de Aprendizaje Atípico:** Propuestas basadas en sistemas de control, recomendación y adquisición de restricciones para personalizar rutas según hábitos individuales [25], [26].

II-D. Brecha y Oportunidad de Investigación

La literatura evidencia una escasa exploración de la *adherencia* como medida de convergencia entre rutas planificadas y reales en el contexto del VRP. Si bien existen estudios que modelan desviaciones [14], [16], no se han desarrollado métricas que evalúen adherencia considerando el orden de clientes ni implementaciones con modelos como XGBoost o regresión Beta.

Además, no se hallan investigaciones que utilicen datos reales de la Región Metropolitana de Santiago para modelar adherencia en VRP con único depósito y clientes zonificados, integrando Modelos de Markov y redes neuronales para predecir distribuciones de probabilidad completas.

En consecuencia, este trabajo busca: (a) definir criterios para la detección de paradas mediante registros GPS; (b) explorar dimensiones explicativas de la adherencia; (c) evaluar modelos predictivos lineales y no lineales; (d) incorporar aprendizaje de preferencias con Modelos de Markov y redes neuronales; (e) clasificar ubicaciones por clusterización geográfica; (f) proponer métricas de costo para el VRP, y (g) comparar solvers heurísticos y exactos.

III. Metodología

III-A. Recopilación y preparación de datos

La principal dimensión para medir la adherencia del conductor a la planificación de la heurística de SimpliRoute corresponde al *orden de clientes*, y es complementada con las dimensiones de *tiempo*, *distancia* y *clientes*. La empresa SimpliRoute proporcionó instancias del VRP con entre 2 y 100 vehículos y de 60 a 200 clientes [1], incluyendo coordenadas, ventanas de tiempo, demandas, capacidades y tiempos de servicio. Solo se consideraron rutas no modificadas manualmente.

Se incorporaron dos fuentes adicionales: registros GPS y checkouts. Los registros GPS fueron filtrados mediante un método basado en entropía [28], [29], considerando un umbral máximo de 150 metros respecto a la ubicación del cliente, y se establecieron reglas de consistencia sobre velocidad, densidad y antigüedad de los puntos. Los checkouts confirmaron visitas y horarios de detención, sin restricción espacial, dado que los conductores pueden registrar la entrega con desfase temporal.

III-B. Definición de adherencia

La adherencia $f_i(P_j, ER_k)$ se define como la concordancia entre la ruta planificada P_j y la ruta efectivamente realizada ER_k, tomando valores en $[0, 1]$. Se establecieron tres dimensiones: *distancia*, *clientes* y *tiempo*, siendo la adherencia en el *orden de clientes* la métrica principal:

$$f_c(P_j, ER_k) = \begin{cases} \dfrac{\text{Arcos coincidentes}}{\text{Arcos en } P_j}, & ER_k \neq \emptyset \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases} \tag{1}$$

III-C. Etiquetado y modelamiento

Los resultados se agruparon en escenarios de alta y baja adherencia según la mediana de las distribuciones. Luego, se desarrollaron tres líneas de modelamiento: (i) predicción de adherencia mediante regresiones (RLC, LASSO, RB, XGB y RF), (ii) aprendizaje de preferencias con modelos de Markov de primer orden y redes neuronales, y (iii) optimización del VRP con distintas matrices de costos.

III-D. Aprendizaje y optimización

Los modelos de Markov estimaron probabilidades de transición entre zonas:

$$\hat{p_{ij}} = P(X_p = j | X_{p-1} = i) = \frac{\hat{p_{ij}}}{\sum_s \hat{p_{is}}} \tag{2}$$

Asimismo, una red neuronal *Multilayer Perceptron* predijo matrices de transiciones entre zonas a partir de vectores zonales de entrada.

Finalmente, el VRP clásico se formuló con restricciones de conectividad y subtours [3], [31], minimizando:

$$\min_{x_{ij}} \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{N} c_{ij} x_{ij} \tag{3}$$

y probando configuraciones de costos basadas en tiempo, distancia y probabilidades Markovianas.

IV. Resultados y Análisis

Los experimentos se organizaron en cuatro bloques: (i) evaluación de la adherencia de rutas, (ii) análisis de errores y relevancia de los modelos de regresión, (iii) comparación de matrices de probabilidad frente a predicciones de redes neuronales, y (iv) comparación de métodos VRP usando aprendizaje de preferencias y datos GPS. Para este estudio se empleó un procesador *Intel Core i7-1260P* y *Python 3.11.7*.

IV-A. Modelos de regresión y selección de variables

Se aplicó validación cruzada de 5 pliegues (80 % train, 20 % test). Para predicción de adherencia en orden, XGBoost mostró el mejor desempeño usando todas las variables ($MSE_{test} = 0{,}019$, $MAPE_{test} = 83{,}21\,\%$), y mantuvo superioridad tras reducción de variables ($MSE_{test} = 0{,}022$, $MAPE_{test} = 90{,}94\,\%$). Las covariables más relevantes incluyeron número de clientes, distancias entre clientes, dispersión geográfica y ventanas horarias.

La regresión lineal permitió analizar efectos clásicos: la relación demanda/capacidad del vehículo, hora de inicio, tiempo de finalización y dispersión geográfica fueron factores determinantes de adherencia. Estos hallazgos confirman que patrones de comportamiento del conductor afectan la adherencia, especialmente en rutas con alta variabilidad.

IV-B. Redes neuronales y aprendizaje de preferencias

Se entrenó un *Multilayer Perceptron* (MLP) optimizando la función de pérdida Cross-Entropy con activación lineal y SGD. La inclusión del identificador de usuario mejoró la generalización, reduciendo la brecha entre entrenamiento y validación. La segmentación de clientes por clusters y comunas mostró que la clasificación por comunas permitió menores pérdidas y mejor ajuste probabilístico. En promedio, las curvas de validación convergieron, indicando que el modelo capturó patrones de comportamiento histórico y puede generalizar sobre datos desconocidos.

IV-C. Solvers de optimización

Se evaluaron 6 métricas de costo en OR-Tools, MIP y Gurobi, utilizando matrices de Markov y MLP. Los resultados indicaron:

- OR-Tools combinado con MLP y clasificación por comunas obtuvo el mayor incremento en adherencia ($\Delta \approx 20,5\,\%$ frente a SimpliRoute).
- La inclusión del ID de usuario en MLP generó mejoras adicionales (2,6–7,1 %) respecto a excluirlo.
- Escalar de instancias a rutas redujo la adherencia promedio en 12,6 %.

IV-D. Conclusiones

XGBoost presentó el menor error en predicción de adherencia. El aprendizaje de preferencias mostró que usar múltiples clientes y clasificación por comunas maximiza la adherencia ($\Delta_{MU} = 18,13\,\%$ frente a $\Delta_{1U} = 10,97\,\%$). OR-Tools combinada con MLP superó a los métodos exactos MIP y Gurobi en la mayoría de escenarios. La inclusión del identificador de usuario mejoró los resultados y la generalización del modelo.

El cambio de escala de instancias a rutas disminuyó la adherencia promedio, indicando la importancia de la granularidad de los datos. Futuras investigaciones podrían explorar características adicionales de adherencia, análisis por franjas horarias y la ponderación de distancia, tiempo y clientes para optimizar la planificación de rutas.

REFERENCIAS

[1] R. Morán, "Aprendizaje automático para detectar factibilidad en el ruteo de vehículos," Tesis de Magíster en Ingeniería Industrial e Investigación de Operaciones, Facultad de Ingeniería y Ciencias, 2023.

[2] T. Vidal, T. G. Crainic, M. Gendreau, N. Lahrichi, y W. Rei, "A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems," *Operations Research*, vol. 60, no. 3, pp. 611–624, 2012, doi: 10.1287/opre.1120.1048. [Online]. Disponible: https://doi.org/10.1287/opre.1120.1048

[3] P. Toth y D. Vigo, *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*, 2014. [Online]. Disponible: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:249430968

[4] H. Müller-Merbach, "Heuristics and their design: a survey,"*European Journal of Operational Research*, vol. 8, no. 1, pp. 1–23, 1981. doi: 10.1016/0377-2217(81)90024-2. [Online]. Disponible: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221781900242

[5] K. Hussain, M. N. Mohd Salleh, S. Cheng, et al., "Metaheuristic Research: A Comprehensive Survey,"*Artificial Intelligence Review*, vol. 52, pp. 2191–2233, 2019. doi: 10.1007/s10462-017-9605-z.

[6] K. Braekers, K. Ramaekers, y I. Van Nieuwenhuyse, "The vehicle routing problem: State of the art classification and review,"*Computers Industrial Engineering*, vol. 99, pp. 300–313, 2016. doi: 10.1016/j.cie.2015.12.007.

[7] Y. Sun, *Decision making process and factors routing*, S.M. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2013. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/1721.1/82853

[8] K. Menger, "Das Botenproblem," *Ergebnisse eines mathematischen Kolloquiums*, vol. 2, no. 4, pp. 11–12, 1932.

[9] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.

[10] G. Laporte, "What you should know about the vehicle routing problem," *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 54, no. 8, pp. 811–819, 2007.

[11] J. Ruiz-Meza, "Problema de ruteo de vehículos multi-objetivo con entregas y recogidas simultáneas y minimización de emisiones," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 29, pp. 435–449, Sep. 2021. [Online]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci$_a rttextpid = S0718 - 33052021000300435nrm = iso$

[11] A. Mor and M. G. Speranza, "Vehicle routing problems over time: a survey," *4OR*, pp. 1–21, 2020.

[12] R. Bai, X. Chen, Z. L. Chen, T. Cui, S. Gong, W. He, and H. Zhang, "Analytics and machine learning in vehicle routing research," *International Journal of Production Research*, vol. 61, no. 1, pp. 4–30, 2023.

[13] V. Ceikute and C. S. Jensen, "Routing service quality—local driver behavior versus routing services," in *Proc. 2013 IEEE 14th International Conference on Mobile Data Management*, June 2013, vol. 1, pp. 97–106.

[14] Y. Li and W. B. Phillips, "Learning from route plan deviation in last-mile delivery," in *Proc. 2018*, [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:169925471

[15] P. Dieter, M. Caron, and G. Schryen, "Integrating driver behavior into last-mile delivery routing: Combining machine learning and optimization in a hybrid decision support framework," *European Journal of Operational Research*, vol. 311, no. 1, pp. 283–300, 2023, doi: 10.1016/j.ejor.2023.04.043. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221723003429

[16] Q. Shao and S.-F. Cheng, "Preference-Aware Delivery Planning for Last-Mile Logistics," in *Proc. of the 2023 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS '23)*, London, United Kingdom, 2023, pp. 1524–1532.

[17] J.-Y. Potvin, G. Dufour, and J.-M. Rousseau, "Learning vehicle dispatching with linear programming models," *Computers & Operations Research*, vol. 20, no. 4, pp. 371–380, 1993.

[18] J. Krumm, "A Markov model for driver turn prediction," in *SAE 2008 World Congress. Lloyd L. Withrow Distinguished Speaker Award*, 2008.

[19] R. Canoy and T. Guns, "Vehicle routing by learning from historical solutions," in *Proc. International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, Cham, Switzerland: Springer, Sep. 2019, pp. 54–70.

[20] N. Ye, Z.-q. Wang, R. Malekian, Q. Lin, and R.-c. Wang, "A method for driving route predictions based on hidden Markov model," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/860828.

[21] R. Canoy, V. Bucarey, J. Mandi, y T. Guns, “Learn and route: learning implicit preferences for vehicle routing,” *Constraints*, vol. 28, pp. 363–396, 2023. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264058804

[22] S. B. Yang y B. Yang, “PathRank: A multitask learning framework to rank paths in spatial networks,” *arXiv preprint arXiv:1907.04028*, 2019.

[23] J. Mandi, R. Canoy, V. B. Lopez y T. Guns, “Data Driven VRP: A neural network model to learn hidden preferences for VRP,” en *27th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2021)*, Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021, pp. 42.

[24] B. Mo, Q. Wang, X. Guo, M. Winkenbach y J. Zhao, “Predicting drivers’ route trajectories in last-mile delivery using a pair-wise attention-based pointer neural network,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 175, p. 103168, 2023, doi: 10.1016/j.tre.2023.103168.

[25] J. Letchner, J. Krumm y E. Horvitz, “Trip Router with Individualized Preferences (TRIP): Incorporating Personalization into Route Planning,” en *Proceedings of AAAI*, 2006, pp. 1795-1800.

[26] C. Bessiere, F. Koriche, N. Lazaar y B. O’Sullivan, “Constraint Acquisition,” *Artificial Intelligence*, vol. 244, pp. 315-342, 2017.

[27] A. Demey, *Analyzing Preferences of Daily Route Planners with Conjoint Analysis*, Master’s thesis, KU Leuven, Leuven, Bélgica, 2022.

[28] K. Gingerich, H. Maoh, y W. Anderson, Çlassifying the purpose of stopped truck events: An application of entropy to GPS data,”*Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 64, pp. 17-27, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.01.002.

[29] F. Basso, M. Núñez, G. Paredes-Belmar, R. Pezoa, y M. Varas, .Estimation of stops of last-mile delivery vehicles: An application in the food industry in the city of Santiago de Chile,”*Journal of Transport Geography*, vol. 116, p. 103854, 2024, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103854.

[30] R. Canoy, V. Bucarey, J. Mandi, M. Mulamba, Y. Molenbruch, y T. Guns, ”Probability estimation and structured output prediction for learning preferences in last mile delivery,”*Computers & Industrial Engineering*, vol. 189, p. 109932, 2024, doi: 10.1016/j.cie.2024.109932.

[31] C. E. Miller, A. W. Tucker, y R. A. Zemlin, Ïnteger Programming Formulation of Traveling Salesman Problems,”*J. ACM*, vol. 7, no. 4, pp. 326–329, Oct. 1960, doi: 10.1145/321043.321046.

Agentic Generative AI for Operations Research: From Modeling to Automated Heuristic Design

Michael Palk
Institute of Information Systems
University of Hamburg
Hamburg, Germany
michael.palk@uni-hamburg.de

Stefan Voß
Institute of Information Systems
University of Hamburg
Hamburg, Germany
stefan.voss@uni-hamburg.de

***Abstract*—Agentic and generative artificial intelligence (AI) are becoming increasingly widespread, especially in conversational human-computer interaction systems. Recent advancements in large language models (LLMs) have opened up numerous possibilities for enhancing the productivity in operations research (OR). Tasks such as implementing model formulations, retrieving or generating benchmark datasets, and creating solution approaches can potentially be assisted by AI-driven systems. These technologies have the potential to accelerate analytical processes and reduce the workload for OR scholars, students, and practitioners. However, despite their advantages, these systems also present several challenges, such as inconsistent responses, hallucinated information, and limited explainability. This study examines the supporting role of agentic and generative AI through different tasks in OR. Both the benefits and limitations of LLM-based agents are examined, and offering a comprehensive understanding of how LLMs can be responsibly integrated into collaborative OR workflows.**

***Index Terms*—agentic AI, generative AI, operations research**

I. Introduction

A relatively new subfield of artificial intelligence (AI) is generative AI, which enables the automatic creation of text, images, videos, and code based on user-provided prompts, i.e., descriptions of the desired output [10]. Chatbots powered by large language models (LLMs) facilitate text-based human-computer interactions and are widely used across various fields, often as part of a multi-agent system (MAS).

While these systems can enhance productivity by aiding in information retrieval, content creation, idea generation, and programming, they also present notable challenges. Issues such as inconsistencies, reproducibility, biases, and the generation of fabricated facts or references, commonly known as hallucinations, remain significant concerns [4]. These issues are particularly critical when using LLMs in scientific research, where accurate knowledge and rigorous citation of peer-reviewed sources are essential for maintaining academic integrity [5]. Previous studies have highlighted the limitations of LLMs in this context, including fabricated references, incorrect metadata, inconsistencies, biases, and difficulties in retrieving specialized research knowledge [17].

This work contributes to the body of knowledge by examining how agentic and generative AI can support different tasks in operations research (OR), such as implementing model formulations, retrieving or generating benchmark datasets, and creating solution approaches in a collaborative human-AI manner. The goal of this paper is the exploration of a reliable, efficient, and responsible integration of agentic and generative AI into various tasks in OR, offering scholars, students, and practitioners a practical toolbox to enhance their workflows.

This paper is structured as follows. In Section II, it is discussed how LLM-based agents can assist in model formulation by implementing and validating models, as well as integrating domain knowledge. How AI tools can be utilized to retrieve, generate, and preprocess benchmark data is explored in Section III. Invoking solvers, guiding the search process, and automated heuristic design by LLMs is subject of Section IV. Furthermore, in Section V, it is demonstrated how these tasks can be embedded in an agentic generative AI workflow. This paper ends in Section VI with a conclusion.

II. Model formulation

In this section, the use of agentic generative AI for model formulation, implementation, and validation is explored.

A. Integrating domain knowledge

Before modeling a problem, it is necessary to gather as much information as possible about the domain. Without such knowledge, false assumptions can arise, distorting the reality and complexity of the situation. LLMs can help by collecting information from various sources, including academic papers, industry reports, and technical documentations. Using a retrieval-augmented generation (RAG) approach [2] can help reduce hallucinations, and knowledge graphs can enable semantic understanding, uncovering relationships, and context-aware reasoning [21]. This knowledge can then be incorporated when defining the objective function and constraints of the optimization model.

B. Model implementation

Implementation of the model can be supported using natural language for optimization (NL4Opt) techniques [6], where prompt engineering (see, e.g., [11]) can help to generate constraints and variables in the target modeling language. LLMs can also act as a sparring partner to verify the logical consistency of the model and ensure that the gathered domain knowledge is accurately reflected in the formulation. This

approach can facilitate the creation of robust and faithful optimization models that closely represent the underlying problem [20].

C. Model validation

Generative AI tools can assist in validating the model by checking for consistency, completeness, and correctness, ensuring that the formulation accurately represents the intended problem. They can also help identify infeasibilities and verify that the model is solvable using the chosen optimization methods [1].

III. Benchmark data

In this section, the retrieval, generation, and preprocessing of benchmark data for optimization problems is addressed using agentic generative AI tools.

A. Data retrieval

LLMs can assist in retrieving benchmark instances that are commonly utilized in the research area, e.g. sourcing them from academic papers [13]. They could also automatically search and extract datasets from repositories referenced within these publications.

B. Data generation

When benchmark instances are not available or do not suit the current model formulation, LLMs can be used to create customized instances tailored to the model, as well as to extend existing benchmarks to better cover relevant scenarios. The gathered domain knowledge can also be incorporated to ensure that the generated data is realistic and representative of plausible scenarios [3].

C. Data preprocessing

AI tools can further support the preprocessing of both retrieved and generated instances, ensuring that the data is complete, consistent, and free of missing values [8]. In addition, they could also assist in transforming and formatting the data appropriately to meet the specific requirements of the solution approaches.

IV. Solution approaches

This section addresses how LLMs can be employed to assist in designing and executing solution approaches.

A. Solver invocation

LLM-based agents can access optimization solvers as external tools using the model context protocol and API calls. This can enable an AI agent to send the correct requests to the solver, ensuring that the appropriate solution methodology is applied to the given model [19].

B. Search processes

By continuously adapting the search strategy based on intermediate results, LLMs can guide (meta)heuristic algorithms to more effectively balance exploration and exploitation [15]. Such dynamic adjustment can not only improve solution quality and convergence speed but also help avoid local optima and respond to changing problem landscapes, as well as perform selection, crossover, and mutation in evolutionary search [18], [9].

C. Automated heuristic design

LLMs can facilitate the creation of novel (meta)heuristics by generating solution strategies that are specifically tailored to particular optimization problems, including evolutionary approaches [12], [23], [16]. This would allow to autonomously propose, refine, and combine heuristics, enabling the discovery of novel strategies. By automated heuristic design and hyper-heuristics, agentic generative AI systems could move beyond conventional methods, potentially improving both solution quality and computational efficiency [14], [7], [22].

V. Agentic generative AI workflow

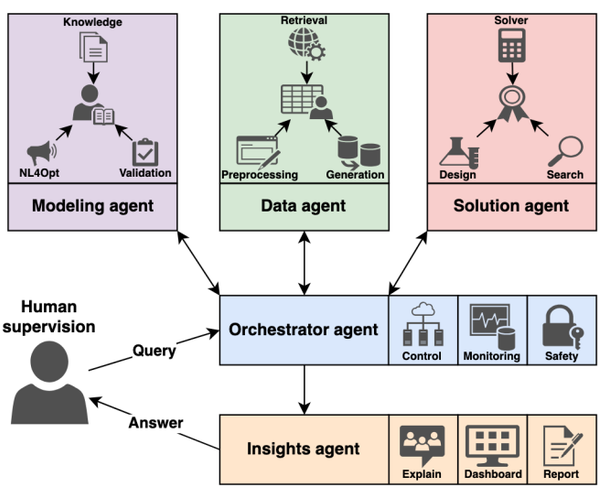


Fig. 1. System architecture of an agentic generative AI workflow for combining different OR tasks in a unified MAS.

In this section, the different tasks reviewed with LLM support in OR are combined into a proposal for an agentic generative AI workflow. The goal is to provide an outlook on how such a process might be implemented to automating certain tasks in OR, illustrated in Fig. 1 as a unified MAS. The workflow starts with a query from a user, who supervises the process in a human-in-the-loop manner. An orchestrator agent coordinates the workflow by controlling other agents, monitoring their status, and ensuring the safety and guardrails of the LLMs. The orchestrator also manages the interplay and communication between agents.

The modeling agent focuses on formulating the correct model, incorporating domain knowledge, and validating the

formulation. The data agent receives information about the created model and retrieves benchmark data or, when such data is unavailable, extends existing instances or generates new instances while incorporating the gathered domain knowledge. Data preprocessing ensures that the data is complete, clean, and in the correct format.

The preprocessed data is then forwarded to the solution agent. Depending on the model formulation, the solution agent can either invoke a solver as a tool or generate its own solution approach by applying or refining existing heuristics. Automated heuristic design comes into play when existing methods are inappropriate due to long runtimes or insufficient solution quality. The resulting solutions can then be forwarded to an insights agent, which ensures explainability for the user, potentially visualizing results in interactive dashboards or producing reports and drafts for papers.

VI. Conclusion

Agentic generative AI holds significant potential to simplify and enhance various tasks in OR. Integrating these tools into a coordinated workflow can provide substantial advantages for both scholars and practitioners, streamlining model formulation, data handling, and solution generation. However, responsible usage is essential, taking into account ethical considerations, transparency, and reliability. Potential risks such as high costs, vendor lock-in, and dependence on AI tools must also be carefully managed. In this fast-paced and rapidly evolving environment, staying up to date with current trends, selecting appropriate LLMs, and choosing the right frameworks remain critical to fully leverage these technologies.

Future work could focus on systematically exploring the limitations of agentic generative AI in OR and advancing towards greater automation of workflows. Ensuring consistency and reliability of results, as well as developing cost-efficient models, will be critical for practical adoption. Additional research could investigate the use of specialized small language models tailored to specific OR domains, which may offer improved performance, reduced resource requirements, and more interpretable outputs. These directions aim to enhance the robustness, efficiency, and applicability of AI-driven support in real-world optimization tasks.

References

[1] H. Chen, G. E. Constante-Flores, and C. Li, "Diagnosing infeasible optimization problems using large language models," *INFOR*, vol. 62, no. 4, pp. 573–587, 2024, doi: 10.1080/03155986.2024.2385189.

[2] J. Chen, H. Lin, X. Han, and L. Sun, "Benchmarking large language models in retrieval-augmented generation," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 38, no. 16, pp. 17 754–17 762, 2024, doi: 10.1609/aaai.v38i16.29728.

[3] M. Goyal and Q. H. Mahmoud, "A systematic review of synthetic data generation techniques using generative AI," *Electronics*, vol. 13, no. 17, p. 3509, 2024, doi: 10.3390/electronics13173509.

[4] L. Huang *et al.*, "A survey on hallucination in large language models: Principles, taxonomy, challenges, and open questions," *ACM Trans. Inf. Syst.*, vol. 43, no. 2, pp. 1–55, 2025, doi: 10.1145/3703155.

[5] A. Kretser *et al.*, "Scientific integrity principles and best practices: Recommendations from a scientific integrity consortium," *Sci. Eng. Ethics*, vol. 25, no. 2, pp. 327–355, 2019, doi: 10.1007/s11948-019-00094-3.

[6] J. Li, R. Wickman, S. Bhatnagar, R. K. Maity, and A. Mukherjee, "Abstract operations research modeling using natural language inputs," *Information*, vol. 16, no. 2, p. 128, 2025, doi: 10.3390/info16020128.

[7] F. Liu *et al.*, "Evolution of Heuristics: Towards efficient automatic algorithm design using large language model," in *ICML'24: Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning*, 2024, pp. 32 201–32 223.

[8] L. Liu *et al.*, "AutoDW: Automatic data wrangling leveraging large language models," in *Proceedings of the 39th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*, 2024, pp. 2041–2052, doi: 10.1145/3691620.3695267.

[9] S. Liu, C. Chen, X. Qu, K. Tang, and Y.-S. Ong, "Large language models as evolutionary optimizers," in *2024 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, vol. 1, 2024, pp. 1–8, doi: 10.1109/CEC60901.2024.10611913.

[10] K.-B. Ooi *et al.*, "The potential of generative artificial intelligence across disciplines: Perspectives and future directions," *J. Comput. Inf. Syst.*, vol. 65, no. 1, pp. 76–107, 2025, doi: 10.1080/08874417.2023.2261010.

[11] L. Pawlik, "How the choice of LLM and prompt engineering affects chatbot effectiveness," *Electronics*, vol. 14, no. 5, p. 888, 2025, doi: 10.3390/electronics14050888.

[12] M. Pluhacek, A. Kazikova, T. Kadavy, A. Viktorin, and R. Senkerik, "Leveraging large language models for the generation of novel metaheuristic optimization algorithms," in *Proceedings of the Companion Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 2023, pp. 1812–1820, doi: 10.1145/3583133.3596401.

[13] M. P. Polak and D. Morgan, "Extracting accurate materials data from research papers with conversational language models and prompt engineering," *Nat. Commun.*, vol. 15, p. 1569, 2024, doi: 10.1038/s41467-024-45914-8.

[14] B. Romera-Paredes *et al.*, "Mathematical discoveries from program search with large language models," *Nature*, vol. 625, pp. 468–475, 2024, doi: 10.1038/s41586-023-06924-6.

[15] C. C. Sartori, C. Blum, F. Bistaffa, and G. Rodríguez Corominas, "Metaheuristics and large language models join forces: Toward an integrated optimization approach," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 2058–2079, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3524176.

[16] N. van Stein and T. Bäck, "LLaMEA: A large language model evolutionary algorithm for automatically generating metaheuristics," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 29, no. 2, pp. 331–345, 2025, doi: 10.1109/TEVC.2024.3497793.

[17] S. Voß, "Bus bunching and bus bridging: What can we learn from generative AI tools like ChatGPT?" *Sustainability*, vol. 15, no. 12, p. 9625, 2023, doi: 10.3390/su15129625.

[18] D. Wang, Z. Zhang, and Y. Teng, "Large language model implemented simulated annealing algorithm for traveling salesman problem," in *2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2024, pp. 209–214, doi: 10.1109/SMC54092.2024.10831145.

[19] S. Wasserkrug, L. Boussioux, and W. Sun, "Combining large language models and OR/MS to make smarter decisions," in *Tutorials in Operations Research: Smarter Decisions for a Better World*. INFORMS, 2024, pp. 1–49, doi: 10.1287/educ.2024.0275.

[20] S. Wasserkrug *et al.*, "Enhancing decision making through the integration of large language models and operations research optimization," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 39, no. 27, pp. 28 643–28 650, 2025, doi: 10.1609/aaai.v39i27.35090.

[21] R. Yang *et al.*, "Graphusion: A RAG framework for scientific knowledge graph construction with a global perspective," in *Companion Proceedings of the ACM on Web Conference 2025*, 2025, pp. 2579–2588, doi: 10.1145/3701716.3717821.

[22] H. Ye *et al.*, "ReEvo: Large language models as hyper-heuristics with reflective evolution," in *NIPS '24: Proceedings of the 38th International Conference on Neural Information Processing Systems*, vol. 37, 2024, pp. 43 571–43 608.

[23] R. Zhong, Y. Xu, C. Zhang, and J. Yu, "Leveraging large language model to generate a novel metaheuristic algorithm with CRISPE framework," *Clust. Comput.*, vol. 27, pp. 13 835–13 869, 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04654-6.

Prostate Cancer Detection in Digitized Images of Core Needle Biopsies

1st Araya, J. C.
Departamento de Anatomía Patológica
Universidad de la Frontera
Temuco, Chile
email address or ORCID

2rd Burgos, M.
Departamento de Anatomía Patológica
Universidad de la Frontera
Temuco, Chile.
m.burgos05@ufromail.cl

3nd Carrasco, M.
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Andes
Santiago, Chile
macarrasco@miuandes.cl

4th Espinoza M.
Departamento de Anatomía Patológica
Universidad de la Frontera
Temuco, Chile.
mirta.espinoza@ufrontera.cl

***Abstract*—In this work, we developed a tool for the detection of prostate cancer in digitized core needle biopsies. A dataset was constructed from biopsy samples collected at the Hernán Henríquez Aravena Hospital in Temuco, Chile. The dataset was built with the collaboration of expert pathologists, who manually annotated the whole slide images (WSIs), identifying the presence or absence of cancer. These annotations served as the ground truth for training our artificial intelligence (AI) system. We evaluated several AI models for the task of binary classification (cancer / no cancer), achieving performance levels comparable to those of expert pathologists. These findings support the potential of the proposed system as a promising decision support tool in the field of digital pathology.**

***Index Terms*—Digital pathology, Binary classification, Deep learning.**

I. Introduction

Prostate cancer is one of the most prevalent types of cancer in men, with a five-year prevalence reaching approximately 20% worldwide. In Chile, this figure rises to 40%, indicating a significant increase compared to global values. Regarding mortality, prostate cancer ranks among the top five causes of cancer-related death in men worldwide, and it was the leading cause of cancer death among men in Chile in 2022 [6]. These data highlight the clinical and epidemiological importance of prostate cancer, and underscore the need for accurate and timely diagnostic tools to support its detection and treatment.

Regarding the diagnostic procedure, clinical suspicion of prostate cancer is typically established through a combination of prostate-specific antigen (PSA) testing and digital rectal examination (DRE). In the Chilean clinical protocol, a PSA value above 4 ng/ml, a suspicious DRE (e.g., presence of a firm nodule), or a rapid PSA increase greater than 0.75 ng/ml per year are common indicators that warrant further investigation. If either PSA or DRE results are abnormal, the patient is referred to a urologist, and a *transrectal ultrasound-guided core needle biopsy* is performed to confirm the presence and assess the stage of prostate cancer [7].

Founding: FONDEF Project ID23I10198 and Fondecyt 1251860.

Our work focuses on this final stage. In a core needle biopsy, prostate tissue samples are collected and fixed on slides stained with *hematoxylin and eosin* (H&E). These slides are then digitized into multiple sections, which are analyzed by an expert pathologist to determine the presence of cancer and assess its severity using the *Gleason grading system*. This system assigns a score from 1 to 5, where Gleason 1 indicates the absence of cancer and Gleason 5 represents the most aggressive form of the disease [5], [11].

Significant inter-pathologist variability in diagnosis has been documented in the literature, as well as intra-pathologist variability, partly attributed to long and demanding work hours [3], [9]. In the Chilean context, there are regions with insufficient staffing or even a complete lack of expert pathologists, which hinders the ability to provide timely and accurate diagnoses. In this context, the implementation of artificial intelligence (AI) systems represents a valuable opportunity to support medical decision-making. However, digital pathology has lagged behind other medical disciplines in adopting these tools into routine laboratory practice. Additionally, in Chile, the high cost of currently available technologies makes their adoption in public hospitals outside the capital particularly difficult.

The development of classification systems for unstructured data, particularly image classification, has experienced significant growth over the past decade, driven by advances in artificial intelligence based on convolutional neural networks (CNNs) [3]. These networks have enabled the resolution of problems that were previously considered intractable using traditional methods. Their integration into medical diagnostics has been especially impactful in fields such as radiology, dermatology, and pathology, where increasingly accurate systems have been developed, with performance often validated against that of human experts [12]. In the case of prostate cancer, Campanella et al. [3] developed an artificial intelligence

model for cancer classification using whole slide images, based on slide-level annotations. Similarly, Bulten et al. [2] proposed various neural network-based systems for grading the aggressiveness of prostate cancer through automated biopsy analysis. In the context of breast cancer, Gecer et al. [4] implemented a convolutional neural network based on AlexNet for binary classification of histopathological images, which was later adapted by Traverso [14] to prostate tissue, yielding promising results. A comprehensive review of the state of the art can be found in [10], where key challenges are highlighted, particularly the high complexity of these models: the large number of parameters to be trained requires massive datasets to achieve satisfactory performance. In this regard, the use of foundation models specifically designed for histopathological images has enabled substantial improvements in classification tasks, achieving outstanding sensitivity and specificity metrics, both in binary classification and in the identification of histological malignancy grades [8].

In this work, we present a tool based on foundation models that enables the identification of cancer presence in digitized biopsies, as well as the grading of its histological severity.

The outline of this paper is as follows: in Section II, we briefly describe the artificial intelligence models used, along with the dataset assembled for cancer detection. In Section III, we define the numerical experiments and report the results obtained for the binary classification task distinguishing malignant from benign tissue. Finally, in Section IV, we present the conclusions of our work and outline directions for future research.

II. Materials and Methods: Dataset Description and IA framework

In this section, we provide a brief description of the dataset, its preprocessing, and an overview of the AI models used.

A. Binary Classification Dataset Description

The dataset consisted of 223 digitized prostate biopsies (Whole Slide Images, WSI) corresponding to 79 patients. Each WSI was accompanied by an annotation file, in which a team of expert pathologists manually labeled regions of interest (ROIs) corresponding to normal and cancerous tissue.

B. General Preprocessing for Dataset Construction

From each WSI, square patches of 256×256 pixels (approximately equivalent to 128×128 micrometers) were extracted. A patch was assigned to a class (normal or cancerous tissue) if at least 75% of its area overlapped with one of the annotated regions by the pathologists. In this way, each patch was associated with a binary label, generating data-label pairs used for training and validating the classification models. As a result of this preprocessing procedure, approximately 221,000 patches were obtained from the 223 WSIs.

C. Artificial Intelligence Models

Below, we highlight three *deep learning* (DL) models that will be analyzed in depth due to their strong performance in numerical experiments:

- EfficientNet-B0: The first model considered is the so called *EfficientNet-B0* [13], a convolutional neural network (CNN) originally trained on natural image datasets, primarily ImageNet. For the binary classification task (cancer / non-cancer), we applied the technique of transfer learning [1], partially fine-tuning the model weights using the prostate biopsy images.
- CNN adapted for prostate biopsies: The second model adopts the convolutional neural network architecture proposed in [4], originally developed for breast histopathology image classification. This architecture was adapted for binary classification on digitized prostate biopsies.
- HistoEncoder: The third approach uses the foundation model introduced in [8]. This model is used to encode each biopsy patch obtained during preprocessing into a feature vector. Based on these latent representations, a multilayer perceptron (MLP) is trained as the final classifier.

III. Experimental Results

In this section, we describe the numerical experiments and results obtained with our system.

All experiments were conducted on a high-performance Linux server equipped with an AMD EPYC 9124 CPU (32 threads), 196 GB of ECC DDR5-4800 RAM, and two NVIDIA RTX 6000 Ada GPUs (2×48 GB). The system features high-throughput NVMe RAID1 storage (2.5 GB/s) and 11 TB of total disk capacity, enabling efficient loading and processing of large-scale histological image datasets. A dedicated hardware RAID controller and dual 10 GbE network interfaces provide robust data integrity and high-speed connectivity. This infrastructure is particularly suited for deep learning applications in computational pathology, where both memory bandwidth and GPU performance are critical.

The results obtained with the architectures described in the previous section are presented below. Specifically, we implemented EfficientNet-B0 (**EffNet-B0**), a CNN adapted for prostate biopsies (**CNN**), and HistoEncoder combined with a multilayer perceptron (**HistoEncoder**). At this stage, the main metrics used to evaluate model performance were: *Accuracy*, *Sensitivity*, *Specificity*, *Precision*, and *F1-score*.

The average performance and standard deviation for each model are summarized in Table I:

TABLE I
AVERAGE PERFORMANCE ($\pm$ STANDARD DEVIATION) OF THE MODELS EVALUATED ON THE BINARY CLASSIFICATION TASK (CANCER / NO CANCER).

Metric	EffNet-B0	CNN	HistoEncoder
Accuracy (%)	82.94 $\pm$ 2.0	86.04 $\pm$ 3.9	**93.15 $\pm$ 2.4**
Sensitivity (%)	83.54 $\pm$ 2.5	88.23 $\pm$ 4.5	**93.06 $\pm$ 2.9**
Specificity (%)	81.89 $\pm$ 3.0	83.41 $\pm$ 9.8	**92.08 $\pm$ 6.0**
Precision (%)	86.16 $\pm$ 2.0	88.47 $\pm$ 6.3	**94.02 $\pm$ 4.3**
F1-score (%)	84.80 $\pm$ 1.5	88.14 $\pm$ 2.9	**93.51 $\pm$ 3.2**

As shown in Table I, all three models achieved solid performance on the binary classification task. Among them, **HistoEncoder** consistently outperformed the other architectures

across all metrics, reaching over 93% accuracy and F1-score, and demonstrating excellent balance between sensitivity and specificity. The **CNN** adapted for biopsies also yielded strong results, particularly in sensitivity and precision, suggesting its ability to detect cancerous regions effectively. **EffNet-B0**, while competitive, exhibited slightly lower performance and higher variance across metrics. These results highlight the benefit of using foundation models pretrained on histopathological data and support their use in prostate cancer classification.

IV. Conclusions

This work presents a deep learning-based tool for the automatic classification of prostate cancer in digitized core needle biopsies. Using a dataset manually annotated by expert pathologists, we trained and evaluated three AI architectures. Among them, one achieved outstanding performance in the binary classification task, reaching 93% accuracy on the test set, suggesting its potential as a clinical decision-support tool in digital pathology.

As part of future work, we aim to extend this approach toward Gleason pattern classification, which is critical for assessing tumor aggressiveness. To this end, we are developing a dedicated dataset for Gleason grading, and preliminary results are encouraging.

These findings highlight the relevance of foundation models and deep learning in histopathological image analysis, and support their integration into diagnostic workflows where interpretability, robustness, and accuracy are essential.

Acknowledgment

The authors want to thank FONDEF Project ID23I10198 and fondecyt 1251860 for their support.

References

[1] T. Aitazaz, A. Tubaishat, F. Al-Obeidat, B. Shah, T. Zia, and A. Tariq. Transfer learning for histopathology images: an empirical study. *Neural Computing and Applications*, 35(11):7963–7974, 2023.

[2] W. Bulten, H. Pinckaers, H. van Boven, R. Vink, T. de Bel, B. van Ginneken, J. van der Laak, C. Hulsbergen-van de Kaa, and Geert L. Automated deep-learning system for gleason grading of prostate cancer using biopsies: a diagnostic study. *The Lancet Oncology*, 21(2):233–241, 2020.

[3] G. Campanella, M. G. Hanna, L. Geneslaw, A. Miraflor, V. Werneck Krauss Silva, K. J. Busam, E. Brogi, V. E. Reuter, D. S. Klimstra, and T. J. Fuchs. Clinical-grade computational pathology using weakly supervised deep learning on whole slide images. *Nature Medicine*, 25:1301–1309, 2019.

[4] Baris Gecer and et al. Detection and classification of cancer in whole slide breast histopathology images using deep convolutional networks. In *Medical Imaging 2018: Digital Pathology*, volume 10581, page 105811F. SPIE, 2018.

[5] Donald F. Gleason. Classification of prostatic carcinomas. *Cancer Chemotherapy Reports*, 50:125–128, 1966. [GL66].

[6] International Agency for Research on Cancer (IARC). Global cancer observatory: Cancer today. prostate cancer statistics, 2022. https://gco.iarc.who.int, 2022. Accessed: July 2025.

[7] Ministerio de Salud de Chile. Cáncer de próstata: Situación epidemiológica en chile. https://diprece.minsal.cl/wrdprss_minsal/wp-content/uploads/2016/03/Cancer-de_prostata_25-nov-2015.pdf, 2015. División de Planificación Sanitaria, Departamento de Epidemiología, MINSAL.

[8] J. Pohjonen, A-O. Batouche, A. Rannikko, K. Sandeman, A. Erickson, E. Pitkanen, and T. Mirtti. Histoencoder: a digital pathology foundation model for prostate cancer. *arXiv preprint arXiv:2411.11458*, 2024.

[9] Stanley J. Robboy, S. Weintraub, A. E. Horvath, B. W. Jensen, C. B. Alexander, E. P. Fody, J. M. Crawford, J. R. Clark, J. Cantor-Weinberg, M. G. Joshi, M. B. Cohen, M. B. Prystowsky, S. M. Bean, S. Gupta, S. Z. Powell, V. O. Jr Speights, D. J. Gross, and W. S. Black-Schaffer. Pathologist workforce in the united states: I. development of a predictive model to examine factors influencing supply. *Archives of Pathology and Laboratory Medicine*, 137(12):1723–1732, 2013.

[10] Artem Shmatko, Narmin Ghaffari Laleh, Moritz Gerstung, and Jakob Nikolas Kather. Artificial intelligence in histopathology: enhancing cancer research and clinical oncology. *Nature Cancer*, 3(9):1026–1038, 2022.

[11] John R. Srigley, Brett Delahunt, Lars Egevad, Hemamali Samaratunga, John Yaxley, and Andrew J. Evans. One is the new six: The international society of urological pathology (isup) patient-focused approach to gleason grading. *Canadian Urological Association Journal*, 10(9–10):339–341, 2016. [Srietal16].

[12] Chetan L. Srinidhi, Ozan Ciga, and Anne L. Martel. Deep neural network models for computational histopathology: A survey. *Medical Image Analysis*, 67:101813, 2021.

[13] Mingxing Tan and Quoc V Le. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv:1905.11946v5*, 2019.

[14] G. Traverso. Aplicación de técnicas de estadística y aprendizaje automático en el diagnóstico médico. Tesis de ingeniería en computación, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Santiago, Chile, 2022.

Session N°2 – Track N°1

Vehicle Routing Problem (VRP)

Chair: Maturana-Ross, J. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
Place: G6-054
Time: 12:10 – 13:25

Automatic Generation of Metaheuristic Algorithms for the Energy Minimization Traveling Salesman Problem

Time: 12:10 – 12:25
Authors:

- Bustos-Romero, A. *(Universidad de Concepción)*
- Contreras-Bolton, C. *(Universidad de Concepción)*

Repositorio de Estrategias Exactas y Heurísticas para el TSP

Time: 12:30 – 12:45
Authors:

- Gómez-Navarro, M. *(Universidad Andrés Bello)*
- Palacios-Díaz, N. *(Universidad Andrés Bello)*
- Linfati, R. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Morillo-Torres, D. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
- Gatica, G. *(Universidad Andres Bello)*

Ruteo de Drones para Delivery con Recogidas en Almacenes

Time: 12:50 – 13:05
Authors:

- Candia-Véjar, A. *(Universidad Finis Terrae)*
- Gómez-Lagos, J. *(Universidad Católica del Maule)*
- Rojas-Espinoza, B. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Exploring Right-hand-side Uncertainty on Insular Vehicle Routing Problems

Time: 13:10 – 13:25
Authors:

- Maturana-Ross, J. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Voß, S. *(Universität Hamburg)*
- Peso, B. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Automatic Generation of Metaheuristic Algorithms for the Energy Minimization Traveling Salesman Problem

Antonio Bustos Romero
Departmento de Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción
Concepción, Chile
antbustos2021@udec.cl

Carlos Contreras-Bolton
Departmento de Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción
Concepción, Chile
carlos.contreras.b@udec.cl

***Abstract*—The Traveling Salesman Problem (TSP) is a combinatorial optimization problem that consists of finding a Hamiltonian circuit that visits a set of cities, starting and ending at the same one. This problem has been studied by many authors and is considered NP-Hard, meaning that its computational complexity grows exponentially with the number of cities involved [5].**

In response to this, we aim to study an important variant of the problem: the TSP with Energy Minimization, where energy consumption is introduced as an additional criterion alongside the traveled distance [1]. This is measured as the sum of the product between the distance and the vehicle's load (including reinforcement weight) over all arcs. Beyond this, the problem remains similar to the original TSP but now considers not only the distance traveled, but also a flow related to each node's position, aiming to minimize both flow and energy consumption.

Given the complexity of the problem—especially when approached using mathematical programming—this work seeks to develop a Metaheuristic Algorithm with Automatic Generation capable of solving this TSP variant. To accomplish this, we will use various metaheuristic approaches, including *Iterated Local Search (ILS)*, *Variable Neighborhood Search (VNS)*, *Simulated Annealing (SA)*, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)*, and *Tabu Search* [6].

This work also proposes an automatic parameter calibration mechanism within the algorithm itself, which ensures a level of solution quality that is difficult to reach with conventional or manual tuning methods [3]. For this calibration, different operators will be developed for intensification, diversification, destruction, initial solution construction, and acceptance criteria. This set of operators aims to balance *global and local search*, enhancing the metaheuristic's robustness across various scenarios.

Currently, we are in the development phase, where the algorithm incorporates various local search operators (such as *2-Opt* and *2-Opt-Swap*), with multiple versions: *first improvement acceptance*, *acceptance if the cost improves over the current best*, and *best global improvement* (which explores the entire neighborhood to find the best move) [6]. These allow us to explore and provide a flexible balance between search intensity and computational efficiency. Additionally, five perturbation operators have been designed, enabling the algorithm to escape local optima and thoroughly explore the solution space. Alongside this, various acceptance criteria have been implemented to manage suboptimal solutions during the search process. Among these are: *Threshold Accepting*, which admits solutions within a predefined deterioration margin; *Simulated Annealing*, which allows probabilistic acceptance based on a decreasing temperature; and *Hill Climbing* (strict variant), which only accepts solutions that improve the objective function.

Each mechanism offers different balances between *exploration and exploitation* of the search space. In addition, various *Nearest Neighbor Heuristic* variants have been designed, incorporating stochastic elements to generate diverse initial solutions.

Although the algorithm is still in the experimental phase, tests have been conducted using instances ranging from 15 to 200 nodes, yielding highly promising results. These instances match those used in previous studies, allowing for direct comparisons and demonstrating the competitiveness of our approach. In these tests, the algorithm has produced high-quality solutions within restricted execution times, a significant step forward highlighting its potential to address complex problems under time constraints.

The next development phase involves applying automated tuning techniques using tools such as `irace`, with the goal of determining the optimal configuration of parameters and components. This *data-driven process* promises to significantly enhance the system's performance, ensuring robust and consistent solutions regardless of the specific characteristics of the analyzed instances.

The Energy Minimization Traveling Salesman Problem (EMTSP) has highly relevant practical applications across various fields, especially in *logistics*, *transportation*, and *urban planning*. It can help reduce transportation and logistics costs, optimize autonomous vehicle routing, lower atmospheric emissions, and even assist in intelligent urban planning—such as designing *public transportation networks* or *bike paths* that minimize energy usage [4].

Theoretically, this work not only pushes the boundaries of combinatorial optimization but also establishes a modular framework extensible to complex variants such as *time windows*, *heterogeneous fleets*, or *multi-depot structures* [2].

This research was supported by Fondecyt Iniciación Project No. 11241132.

REFERENCES

[1] V. Cacchiani et al., "The Pollution-Routing Problem: The Effect of Different Speed and Load-Dependent Fuel Consumption Models," *International Transactions in Operational Research*, vol. 30, pp. 655–687, 2023.

[2] M. Birattari et al., "Automated algorithm configuration and parameter tuning," in *Handbook of Metaheuristics*, Springer, 2019, pp. 587–609.

[3] M. López-Ibáñez et al., "The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration," *Operations Research Perspectives*, vol. 3, pp. 43–58, 2016.

[4] E. Demir, T. Bektaş, and G. Laporte, "A review of recent research on green road freight transportation," *European Journal of Operational Research*, vol. 237, no. 3, pp. 775–793, 2014.

[5] G. Clarke and J. W. Wright, "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Operations Research*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, 1964.

[6] Santini, A., Ropke, S. Hvattum, L.M. A comparison of acceptance criteria for the adaptive large neighbourhood search metaheuristic. J Heuristics 24, 783–815 (2018). https://doi.org/10.1007/s10732-018-9377-x

Repositorio de Estrategias Exactas y Heurísticas para el TSP

1ro Martín Gómez-Navarro
Facultad de Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago de Chile, Chile
m.gmeznavarro@uandresbello.edu

2do Nicolás Palacios-Díaz
Facultad de Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago de Chile, Chile
n.palaciosdaz@uandresbello.edu

3ro Rodrigo Linfati
Department of Industrial Engineering
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
rlinfati@ubiobio.cl

4to Daniel Morillo-Torres
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Cali, Colombia
daniel.morillo@javerianacali.edu.co

5to Gustavo Gatica
Facultad de Ingeniería
Universidad Andres Bello
Santiago, Chile
ggatica@unab.cl

***Abstract*—El Problema del Vendedor Viajero (TSP, por sus siglas en inglés) es uno de los problemas más estudiados y representativos en el campo de la optimización combinatoria. Las técnicas desarrolladas para su resolución han sido ampliamente aplicadas en diversas variantes y problemas relacionados. No obstante, la implementación computacional de estas técnicas resulta un desafío para estudiantes e investigadores en formación, especialmente cuando se carece de acceso a códigos e instancias de prueba bien documentados.**

A pesar que el TSP forma parte de los planes de estudio en niveles de pregrado y postgrado en disciplinas como la ingeniería, las matemáticas o la ciencia de la computación, existe una brecha en cuanto a recursos educativos accesibles y estructurados para su aprendizaje práctico.

Con el objetivo de abordar esta necesidad, se presenta un repositorio público y escalable que reúne un conjunto de diez técnicas de resolución para el TSP, desde un clásico branch and bound, técnicas de programación dinámica, algoritmos heurísticos básicos hasta estrategias metaheurísticas avanzadas. Este repositorio no solo proporciona una base sólida para el estudio del TSP clásico, sino que también permite su extensión a generalizaciones del problema, convirtiéndose así en una herramienta útil para fines docentes e investigaciones. El proceso de validación de cada uno de los algoritmos se realiza con las instancias del TSPLIB, sin embargo, los códigos permiten el testear otras instancias de la literatura.

I. Introducción

El problema del vendedor viajero (PVV), también conocido como TSP por sus siglas en inglés (Traveling Salesperson Problem), es uno de los más estudiados en optimización combinatoria y teoría de grafos. Consiste en encontrar la ruta más corta posible que permita a un viajero visitar un conjunto de ciudades exactamente una vez y regresar al punto de partida. A pesar de su formulación sencilla, el TSP pertenece a la clase de problemas NP-Hard, es decir, no se conoce un algoritmo que lo resuelva de forma exacta y en tiempo polinómico para instancias de tamaño realista o grandes. Un algoritmo polinómico es aquel cuyo tiempo de ejecución crece de forma razonable con respecto al número de nodos, como n^2 o n^3. En cambio, el TSP presenta un crecimiento factorial del número de soluciones posibles ($n!$), lo que hace que el tiempo necesario para resolverlo aumente rápidamente. Esto significa que, aunque sí es posible encontrar soluciones óptimas para problemas pequeños en muy poco tiempo, para instancias grandes los métodos exactos se vuelven imprácticos. [1]. El TSP no sólo tiene relevancia teórica, sino también en aplicaciones prácticas para logística, diseño de circuitos, planificación de rutas, robótica, etc [2]. Sin embargo, a medida que aumenta el número de nodos, el espacio de soluciones crece factorialmente, lo que significa que el número de rutas posibles aumenta explosivamente a medida que se agregan más nodos. Esto vuelve inviables los enfoques exactos como la búsqueda exhaustiva o la programación lineal entera en tiempos razonables para problemas grandes. Sin embargo, existen herramientas altamente optimizadas, como *Concorde*, que han logrado resolver instancias con hasta 85.900 nodos mediante técnicas avanzadas y un uso intensivo de recursos computacionales, lo que representa un caso excepcional dada la complejidad del problema. Por ello, la investigación y disponibilización de un repositorio representa una valiosa contribución al aprendizaje. Frente a estas limitaciones, se recurre frecuentemente a las heurísticas, que son métodos de resolución aproximada. Una *heurística* no garantiza encontrar la solución óptima, pero permite obtener resultados suficientemente buenos en tiempos razonables. Estas técnicas son especialmente útiles cuando se requiere eficiencia computacional y no es viable aplicar un algoritmo exacto. Aunque las heurísticas no aseguran la solución óptima, permiten obtener buenos resultados con menor esfuerzo computacional. Además, son útiles para aprender sobre teoría de grafos, algoritmos y optimización [3]. Actualmente, la información sobre el TSP está muy dispersa: hay repositorios con poca documentación, sitios con buenas explicaciones pero sin código, y recursos poco didácticos [4],

[5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Esta dispersión de información complica el estudio del TSP y la comparación de métodos. Por eso, se creó un repositorio público con diez algoritmos en Python, que incluye explicaciones teóricas, código comentado y un enfoque didáctico para facilitar el aprendizaje.

El lenguaje Python fue seleccionado debido a su enfoque didáctico y su sintaxis clara y legible, que facilita la comprensión de conceptos fundamentales de programación [12]. A diferencia de otros lenguajes más verbosos o con sintaxis compleja, Python permite centrarse en la lógica del problema en lugar de los detalles del lenguaje, lo cual lo convierte en una herramienta ideal tanto para la enseñanza como para el desarrollo de prototipos funcionales [12].

II. Metodología de Desarrollo

Para llevar a cabo esta investigación y recopilación se siguió un enfoque *iterativo-incremental* [13]. La Figura 1 muestra cómo se estructura y aplica este enfoque en la práctica.

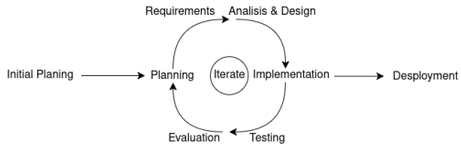


Fig. 1. Ciclo iterativo-incremental utilizado para implementar métodos.

Cada ciclo constó de:

1) Establecer un algoritmo a investigar.
2) Realizar una investigación académica sobre el algoritmo y recopilar documentación.
3) Realizar una búsqueda de repositorios públicos que implementen el método.
4) Seleccionar y probar los repositorios.
5) Adaptar el código para compatibilizar con nuestra librería de pruebas.
6) Realizar pruebas y comparar resultados con los óptimos.

Este procedimiento permitió profundizar en la teoría y llevar a la práctica cada uno de los métodos y algoritmos propuestos.

III. Librería de Pruebas

Se implementó una capa de abstracción para ejecutar los diferentes algoritmos de cada repositorio, esto con el objetivo de unificar y entregar una interfaz intuitiva que permita realizar pruebas con benchmarks y obtener resultados con la misma estructura. De esta forma también la librería es capaz de almacenar cada resultado de cada instancia por cada repositorio y obtener una tabla comparativa que incluye las métricas de CPUTIME, GABPKS y los parámetros utilizados.

A. Carpeta de Salida

En cada ejecución del sistema, se crea de forma automática un directorio de salida que almacena los resultados generados. Este directorio incluye los siguientes componentes:

- recorrido obtenido almacenado como $\{instancia\}.tour$
- Archivo *resultados.csv* con los siguientes elementos:

  Nombre de la instancia
  Algoritmo implementado
  Mejor valor obtenido
  Valor óptimo
  Distancia entre el mejor valor obtenido y conocido (GAPBKS)
  Tiempo de procesamiento (CPUTIME)
- Imagen opcional con la ruta obtenida *plot.png*

B. Repositorio de pruebas

Los códigos recopilados están disponibles en la ruta *./repos*. Además, en la ruta *./src* se encuentra el código principal, el cual permite ejecutar pruebas automáticas sobre los diferentes algoritmos, según las instancias especificadas. Este proceso genera una tabla comparativa entre los algoritmos evaluados. También, con el apoyo de la librería ya mencionada, se generan archivos de salida para cada ejecución, los cuales se almacenan en la carpeta *./output*. Los archivos de entrada, en formato TSPLIB, se encuentran en la carpeta *./input*.

Los requisitos necesarios para utilizar el repositorio están especificados en el archivo *./requirements.txt*, siguiendo la convención habitual en proyectos de Python. Estos requisitos consideran las dependencias necesarias de los códigos recopilados.

Para cada uno de los repositorios se creó un script llamado $customCode\{N^o\}.py$, ubicado en la raíz de cada repositorio. Este script actúa como una capa intermedia que transforma los archivos de entrada a un formato compatible con el algoritmo actual y, posteriormente, convierte la salida al formato original para mantener la consistencia entre los distintos códigos.

El repositorio se encuentra disponible en la siguiente URL: github.com/njpd57/tsp-test-repository.

IV. Algoritmos Implementados

Se han integrado 10 algoritmos para resolver el TSP, en la Tabla I se podrán observar los algoritmos implementados y sus fuentes. Estos algoritmos abarcan desde enfoques exactos, como la Búsqueda Exhaustiva, Branch & Bound y Held-Karp, hasta métodos heurísticos y metaheurísticos como Nearest Neighbour, 2-OPT, Recocido Simulado, Algoritmos Genéticos, Optimización por Colonia de Hormigas y Búsqueda Tabú. La diversidad de técnicas permite analizar y comparar el rendimiento de cada enfoque frente a diferentes tamaños y características de instancias del problema. Todos los algoritmos fueron obtenidos de repositorios públicos en GitHub.

V. Experimentos y Resultados

Para comparar el rendimiento los algoritmos presentados en la Tabla I se realizaron experimentos con instancias clásicas de la biblioteca TSPLIB, ampliamente usada como benchmark. Estas instancias varían en tamaño y complejidad, lo que permite evaluar tanto la calidad de las soluciones como el tiempo de ejecución.

Se realizaron pruebas con 26 instancias, donde para cada instancia y algoritmo se reportan el tiempo de ejecución, la distancia obtenida, la distancia óptima y el GAP porcentual

TABLE I
REPOSITORIOS DE ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

N.º	Algoritmo	Repositorio Github
1	Búsqueda Exhaustiva	Kacper-Sleziak/Travelling_Salesman_Problem [4]
2	Branch & Bound	Kacper-Sleziak/Travelling_Salesman_Problem [4]
3	Held-Karp	carl-olin/held-karp [6]
4	Nearest Neighbour	m3hdi-i/tsp-with-nn [8]
5	2-OPT	pdrm83/py2opt [14]
6	Simulated Annealing	Kacper-Sleziak/Travelling_Salesman_Problem [4]
7	Genetic Algorithm	hassanzadehmahdi/Traveling-Salesman-Problem-using-Genetic-Algorithm [11]
8	Ant Colony Optimization	Josephbakulikira/Traveling-Salesman-Algorithm [9]
9	Tabu Search	Xavier-MaYiMing/Tabu-Search [10]
10	GSPH	IncfDevuser/gsph_toolkit [15]

respecto al óptimo, que indica qué tan lejos está la solución obtenida del valor de referencia. A continuación se presentan 4 a modo ilustrativo. Estos se seleccionaron para mostrar de forma representativa el desempeño de los algoritmos evaluados. Los resultados se encuentran en las Tablas II a IV,

TABLE II
RESULTADOS PARA LA INSTANCIA BERLIN52

Repositorio	Tiempo (s)	Distancia	BKS	GAPBKS
NearestNeighbour	0.0003	9192	7542	21.9%
GeneticAlgorithm	6.179	9103	7542	20.7%
TabuSearch	0.4742	8455	7542	12.1%
AntSystem1	0.2178	8267	7542	9.6%
AntSystem2	0.2215	8140	7542	7.9%
AntSystem3	0.2197	8605	7542	14.1%
2-OPT	0.0005	7821	7542	3.7%
SimulatedAnnealing	0.5476	8139	7542	7.9%
GSPH_FC	0.0196	7674	7542	1.8%

TABLE III
RESULTADOS PARA LA INSTANCIA EIL101

Repositorio	Tiempo (s)	Distancia	BKS	GAPBKS
NearestNeighbour	0.0019	858	629	36.4%
GeneticAlgorithm	17.6505	1073	629	70.6%
TabuSearch	3.5018	1218	629	93.7%
AntSystem1	1.0123	763	629	21.2%
AntSystem2	0.997	775	629	23.3%
AntSystem3	1.0175	846	629	34.4%
2-OPT	0.0023	674	629	7.2%
SimulatedAnnealing	0.9247	762	629	21.1%
GSPH_FC	0.1303	664	629	5.6%

VI. CONCLUSIÓN

Se disponibiliza un repositorio para el aprendizaje y estudio del clásico TSP. No se persigue obtener mejores BKS solo facilitar en un único repositorio un conjunto de algoritmos para el TSP.

TABLE IV
RESULTADOS PARA LA INSTANCIA KROD100

Repositorio	Tiempo (s)	Distancia	BKS	GAPBKS
NearestNeighbour	0.0019	28614	21294	34.4%
GeneticAlgorithm	17.0096	48744	21294	128.9%
TabuSearch	3.3796	54332	21294	155.2%
AntSystem1	0.9557	24118	21294	13.3%
AntSystem2	0.9701	24746	21294	16.2%
AntSystem3	0.9738	27507	21294	29.2%
2-OPT	0.0028	21829	21294	2.5%
SimulatedAnnealing	1.0325	24117	21294	13.3%
GSPH_FC	0.1343	22559	21294	5.9%

REFERENCES

[1] M. Jünger, G. Reinelt, and G. Rinaldi, "The traveling salesman problem," *Handbooks in operations research and management science*, vol. 7, pp. 225–330, 1995.

[2] R. Matai, S. P. Singh, and M. L. Mittal, "Traveling salesman problem: An overview of applications, formulations, and solution approaches," *Traveling salesman problem, theory and applications*, vol. 1, no. 1, pp. 1–25, 2010.

[3] C. H. Papadimitriou and K. Steiglitz, *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. Courier Corporation, 1998.

[4] K. Śleziak, *Travelling Salesman Problem*, 2022. [Online]. Available: https://github.com/Kacper-Sleziak/Travelling_Salesman_Problem.

[5] Z. Mejdoul, $tsp_solving_dp_gvns$, 2022. [Online]. Available: https://github.com/zakariamejdoul/tsp_solving_dp_gvns.

[6] C. Olin, *heldkarp*, 2015. [Online]. Available: https://github.com/carl-olin/held-karp.

[7] R. Maynard Etchepare, *TSP models and Algorithms*, 2025. [Online]. Available: https://github.com/RenatoMaynard/TSP-models-and-Algorithms.

[8] M. I., *tsp with nn*, 2021. [Online]. Available: https://github.com/m3hdi-i/tsp-with-nn.

[9] J. bakulikira, *Traveling Salesman Algorithm*, 2023. [Online]. Available: https://github.com/Josephbakulikira/Traveling-Salesman-Algorithm.

[10] X. Yi-Ming Ma, *Tabu Search*, 2022. [Online]. Available: https://github.com/Xavier-MaYiMing/Tabu-Search.

[11] M. Hassanzadeh, *Traveling Salesman Problem using Genetic Algorithm*, 2022. [Online]. Available: https://github.com/hassanzadehmahdi/Traveling-Salesman-Problem-using-Genetic-Algorithm.

[12] W. Python, "Python," *Python releases for windows*, vol. 24, 2021.

[13] I. Sommerville, *Ingeniería del software*. Pearson educación, 2005.

[14] P. Ataee, *py2opt*, 2023. [Online]. Available: https://github.com/pdrm83/py2opt.

[15] M. Gómez, *GSPH Toolkit – Heurísticas Educativas para el Problema del Viajante (TS*, 2025. [Online]. Available: https://github.com/incfDevuser/gsph_toolkit.

Ruteo de drones para delivery con recogidas en almacenes

Alfredo Candia-Véjar
Facultad de Ingeniería
Universidad Finis Terrae
Santiago, Chile
acandia@uft.cl

Javier Gómez-Lagos
Facultad de Ingeniería
Universidad Católica del Maule
Talca, Chile
jgomezl@ucm.cl

Benjamín Rojas-Espinoza
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
bgrojas@uc.cl

***Abstract*—Este trabajo presenta una nueva variante del problema de ruteo con drones para delivery. En esta variante, los drones inician y terminan su operación en un depósito común, consolidando el pedido de cada cliente en uno o más almacenes. Una vez completada la entrega a todos los clientes, los drones retornan al depósito. El criterio de optimización usado es el makespan asociado al tiempo recorrido por los drones. Se presenta el modelo matemático, una metaheurística híbrida GRASP/VND, y consideraciones para el tratamiento de la energía de los drones. Se define un conjunto de instancias para el problema, y se realizan experimentos con estas instancias para mostrar el comportamiento de los algoritmos implementados.**

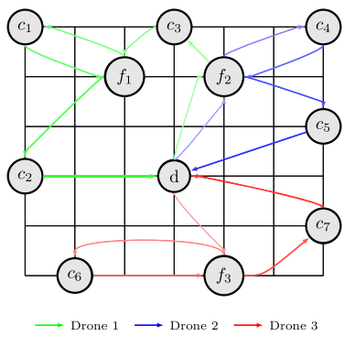
***Index Terms*—Ruteo de drones, Programación lineal entera, GRASP/VND**

I. Introducción

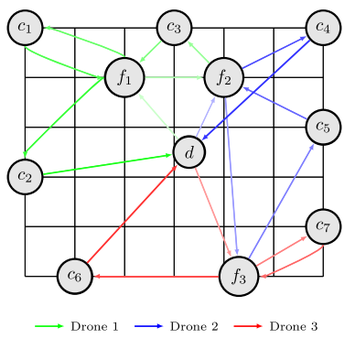
El problema de ruteo con drones está cumpliendo 10 años, y existe un gran caudal de variantes, algoritmos y aplicaciones. Un excelente artículo de revisión reciente es [1]. La gran mayoría de las variantes para problemas de ruteo con drones considera uno o más depósitos, un conjunto de clientes, y una flota de drones que realizan las entregas. En nuestro caso, el problema introduce un conjunto de almacenes, que es donde se recogen los productos pedidos por los clientes. Un cliente puede ordenar un pedido con una o más unidades de diferentes productos si satisface las condiciones de volumen y peso de los drones.

La Figura 1 muestra dos variantes del problema. Arriba, aquella en que existe inventario completo en los almacenes de manera que el pedido de un cliente se puede consolidar en un solo almacén. Esta variante, con modelos y algoritmos, está desarrollada en [2], y se demostró que es un problema NP-Hard. Abajo, se muestra el caso donde es necesario visitar uno o más almacenes para consolidar el pedido. Notamos entonces que la consolidación obliga al dron a conformar un camino que comienza en el último nodo cliente visitado, sigue con la recogida en varios almacenes y termina con la entrega al cliente. De esta forma, esta segunda variante que incluye una fase de consolidación, agrega una componente adicional de complejidad al problema con inventario completo en cada almacén.

Este problema de Ruteo de Drones para Delivery con Recogidas en Almacenes lo denotaremos por (RDDRA).



(a)



(b)

Fig. 1: Una red del RDDRA es mostrada en (a) y una solución factible usando tres drones es mostrada en (b)

II. El Modelo de Optimización para RDDRA

Definición de parámetros del modelo:
- Número de clientes $|C|$.
- Tamaño de la flota de drones $|V|$.
- Arcos de la red $|A|$.
- Arcos del camino interno entre dos clientes i y j, $B_{i,j}$.
- Matriz de tiempos de viaje depósito-almacenes, depósito-clientes, y depósito-depósito $|D|$.
- Producto p pedido por el cliente j, Q_{pj} .
- Inventario del producto p en almacén f, O_{pf}.

Definición de Variables

- $x_{ijv} \in \{0,1\}$ donde $x_{ijv} = 1$ si el dron v, después de servir el pedido del cliente i, sirve inmediatamente el pedido del cliente j, $x_{ijv} = 0$ en otro caso, donde $(i,j) \in A, v \in V$.
- $y_{ij}^{mnv} \in \{0,1\}$, donde $y_{ij}^{mnv} = 1$ si el dron v viaja del nodo m al nodo n, en un viaje que comienza en el nodo i y termina en el nodo j, donde $(i,j) \in A, (m,n) \in B_{ij}, v \in V$.
- t_{fjp}: cantidad del producto p recogido en el almacén f para la orden del cliente j, donde $f \in F, j \in C, p \in \hat{P}_f \cap \bar{P}_j$.
- w: el makespan producido por la operación de la flota de drones.

EL MILP para el problema es el siguiente.

$$\min w \tag{1}$$

subject to

$$w \geq \sum_{(i,j)\in A} \sum_{(m,n)\in B_{ij}} D_{mn} y_{ij}^{mnv}, v \in V \tag{2}$$

$$\sum_{(0,j)\in A} x_{0jv} = 1, v \in V \tag{3}$$

$$\sum_{(i,0)\in A} x_{i0v} = 1, v \in V \tag{4}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} \sum_{v\in V} x_{ijv} = 1, i \in C \tag{5}$$

$$\sum_{(i,h)\in A} x_{ihv} - \sum_{(h,j)\in A} x_{hjv} = 0, h \in C, v \in V \tag{6}$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (|C|+2)(1 - x_{ijv}), (i,j) \in A, v \in V : j \neq 0 \tag{7}$$

$$\sum_{(i,n)\in B_{ij}} y_{ij}^{inv} = x_{ijv}, (i,j) \in A, v \in V \tag{8}$$

$$\sum_{(m,j)\in B_{ij}} y_{ij}^{mjv} = x_{ijv}, (i,j) \in A, v \in V \tag{9}$$

$$\sum_{(m,h)\in B_{ij}} y_{ij}^{mhv} - \sum_{(h,n)\in B_{ij}} y_{ij}^{hnv} = 0, h \in F, (i,j) \in A, v \in V \tag{10}$$

$$\hat{u}_{ij}^{m} - \hat{u}_{ij}^{n} + 1 \leq |R_{ij}|(1 - y_{ij}^{mnv}), (i,j) \in A, (m,n) \in B_{ij}, v \in V \tag{11}$$

$$t_{fjp} \leq \sum_{(i,j)\in A} \sum_{(f,n)\in B_{ij}} \sum_{v\in V} Q_{pj} y_{ij}^{fnv}, f \in F, j \in C, p \in \hat{P}_f \cap \bar{P}_j \tag{12}$$

$$\sum_{f\in \hat{F}_p} t_{fjp} = Q_{pj}, p \in P, j \in \bar{C}_p \tag{13}$$

$$\sum_{j\in \bar{C}_p} t_{fjp} \leq O_{pf}, p \in P, f \in \hat{F}_p \tag{14}$$

$$u_i \geq 0, i \in N_0 \tag{15}$$

$$\hat{u}_{ij}^{n} \geq 0, (i,j) \in A, n \in R_{ij} \tag{16}$$

$$t_{fjp} \geq 0, f \in F, j \in C, p \in \hat{P}_f \cap \bar{P}_j \tag{17}$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\}, (i,j) \in A, v \in V \tag{18}$$

$$y_{ij}^{mnv} \in \{0,1\}, (i,j) \in A, (m,n) \in B_{ij}, v \in V \tag{19}$$

La función objetivo (1), acompañada de las restricciones (2), minimiza el makespan acerca del tiempo viajado por los drones. (3) y (4) aseguran que cada dron sale del depósito y vuelve a él. (5) garantiza que cada cliente es atendido, (6) permite la conectividad de la ruta y (7) evita subtours para los drones respecto a los clientes visitados. (8) y (9) permiten conectar la ruta de los drones con los caminos que consolidan los pedidos. (10) garantiza el camino en la consolidación, y (11) evita subtours para los caminos. (12) limita la recogida de productos respecto a los almacenes abiertos, (13) obliga a la satisfacción de los pedidos, y (14) limita la recogida de productos respecto al inventario en los almacenes. (15)-(19) definen los valores de las variables.

A. Esquema de la Metaheurística

La Figura 2 muestra el esquema metaheurístico empleado.

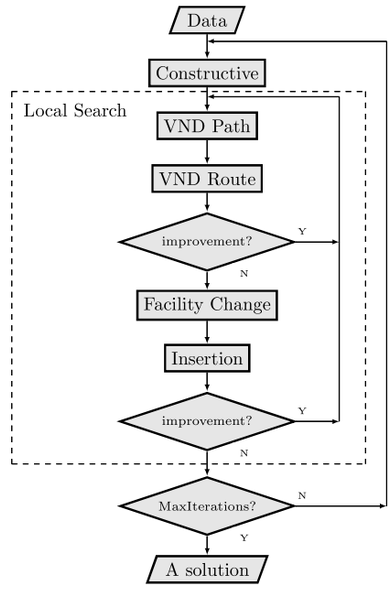


Fig. 2: Un Diagrama de flujo mostrando el enfoque metaheurístico

III. Resultados de Experimentos Computacionales

A. Instancias generadas

- Definimos el número de clientes $|C| \in \{5, 10, 15, 20\}$ y $|F| \in \{3, 5, 7\}$. También, definimos la cantidad de productos $|P| \in \{20, 40\}$.
- La oferta (almacén) y demanda (cliente) del conjunto de productos es manejada por propiedades estadísticas.
- Debido a una estrategia acumulativa de construcción, cuando un cliente/almacén se agrega o se elimina, su respectiva demanda/oferta también cambia.

B. Resultados

- CPLEX v.12.9 fue usado para resolver las formulaciones MILP. Imponemos un límite superior de 3.600 segundos para cada corrida de CPLEX.
- Para la metaheurística, usamos 100 iteraciones para GRASP y un criterio de mínimo local para los esquemas VND. El tiempo está limitado a 3.600 segundos.
- La variante del problema donde el inventario limitado fuerza la visita de los drones a más de un almacén deja al problema muy difícil de resolver con el modelo matemático.
- El algoritmo híbrido GRASP/VND puede resolver instancias mayores en bajos tiempos de corrida.

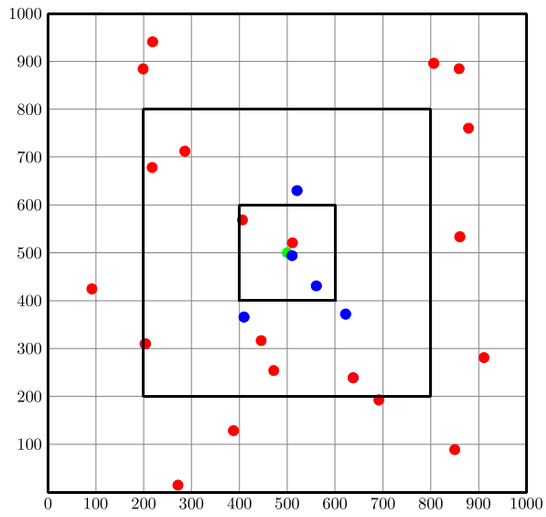


Fig. 3: Ejemplo de instancia para el RDDRA

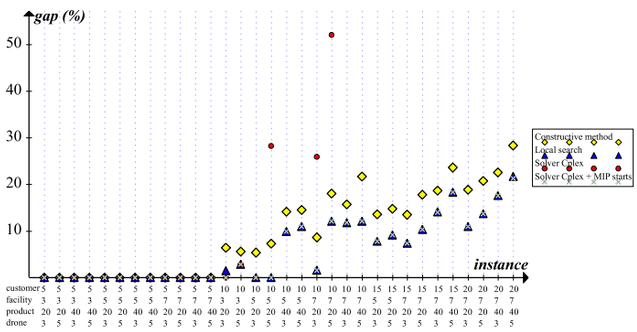


Fig. 4: Gap obtenidos con los métodos

IV. Conclusiones

El problema RDDRA es una nueva variante del problema de ruteo con drones en donde los pedidos de los clientes se consolidan en diferentes almacenes. Dada la alta complejidad del problema, la formulación matemática permite resolver solamente problemas pequeños con optimalidad. Sin embargo, la metaheuristica propuesta permite encontrar soluciones factibles con bajo gap, para problemas de tamaño mayor.

References

[1] O. Dukkanci, J. Campbell, and B. Kara, "Facility location decisions for drone delivery: A literature review", European J. of Operational Research, Vol. 316, number 2, pp. 397-418, 2024.

[2] J. Gómez-Lagos, B. Rojas-Espinoza, A. Candia-Véjar, On a pickup to delivery drone routing problem: Models and algorithms, Computers & Industrial Engineering, vol. 172, Part B, 108632.

Exploring Right-hand-side Uncertainty on Insular Vehicle Routing Problems

Javier Maturana-Ross
School of Industrial Engineering
PUCV
Valparaíso, Chile
javier.maturana@pucv.cl

Stefan Voß
Institute of Information Systems
University of Hamburg
Hamburg, Germany
stefan.voss@uni-hamburg.de

Benjamin Peso
School of Industrial Engineering
PUCV
Valparaíso, Chile
benjamin.peso@pucv.cl

***Abstract*— Effective maritime logistics planning for island networks presents unique challenges, particularly in archipelagos like Chiloé where communities depend critically on reliable waste collection and resource distribution systems. Conventional optimization approaches often produce fragile solutions by neglecting real-world uncertainties - including weather-related port closures and vessel breakdowns - that routinely disrupt operations. Our research advances the Bi-Objective Insular Vehicle Routing Problem (BO-InVRP) by explicitly modeling right-hand-side (RHS) uncertainty in critical infrastructure availability. We develop a novel stochastic-robust optimization framework that combines exact methods with scenario planning to simultaneously minimize maritime (MTC) and ground transportation costs (GTC) while ensuring operational reliability.**

Keywords—Insular, Traveling Salesman, Right-hand-side Uncertainty, Logistics, Multi-objective

I. Introduction

Maritime logistics in island regions present unique challenges that require sophisticated planning approaches. In archipelagos like Chiloé in southern Chile, communities depend heavily on reliable waste collection and supply chain systems that are particularly vulnerable to disruptions. The complex geography, combined with frequent weather-related port closures and vessel availability issues, creates an environment where traditional deterministic optimization models often fall short. These models typically fail to account for the inherent uncertainties in real-world operations, potentially leading to solutions that are theoretically optimal but practically infeasible when disruptions occur.

This study focuses on enhancing the Bi-Objective Insular Vehicle Routing Problem (BO-InVRP) by incorporating right-hand-side (RHS) uncertainty into the optimization framework. While previous research has developed valuable deterministic formulations for island logistics, our work addresses the critical gap in handling unpredictable variations in port and vessel availability.

The core of our methodology lies in developing a mathematical framework that can simultaneously consider multiple scenarios of port and vessel availability while maintaining solution feasibility. This is complemented by a robust optimization component that ensures solutions remain viable even under worst-case disruption scenarios. Our preliminary computational experiments demonstrate the model's ability to maintain feasible routing plans despite significant reductions in port availability, providing practical insights for logistics planners by analyzing the Pareto Front.

This extended abstract presents our current progress in developing this theoretical framework, with future work planned to implement and test the complete solution approach. The following sections detail our mathematical models, solution methodology, preliminary results, and directions for future research, highlighting the potential of this approach to improve maritime logistics planning in vulnerable island communities.

II. Models and Methodology

Our framework addresses the critical challenge of maritime logistics planning under uncertainty through a dual modeling approach that combines stochastic and robust optimization techniques. The proposed mathematical formulation extends the traditional BO-InTSP into the BO-InVRP (i.e., more than one vessel is available for collecting the freight) and introducing random binary parameters representing the operational status of docks and vessels, where a value of 1 indicates availability and 0 indicates unavailability.

The stochastic component of our model utilizes Bernoulli probability distributions to generate multiple availability scenarios. Each dock *i* maintains an independent probability pi of being operational, while each vessel *v* has a given probability of being available. This probabilistic framework enables evaluation of expected system performance across various potential operating conditions. Complementing this, our robust optimization approach employs budgeted uncertainty sets to establish worst-case bounds - limiting the maximum number of docks and vessels that may simultaneously become unavailable. This combined approach provides decision-makers with a spectrum of solutions ranging from risk-neutral to risk-averse strategies.

In our current implementation, we focus on exact solution methods, particularly the AUGMECON2 algorithm for multi-objective optimization. This method efficiently generates Pareto-optimal solutions that reveal the fundamental trade-offs between maritime transportation costs (MTC) and ground transportation costs (GTC). The algorithm processes availability constraints through scenario-based programming, evaluating solution feasibility across multiple realizations of the random availability variables. This proves particularly valuable for

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

island logistics, where frequent but unpredictable disruptions require solutions that remain viable under varying conditions.

For preliminary testing, we adapted synthetic data from the literature to include the random binary parameters. These instances consider different criticality levels in infrastructure availability, allowing us to assess our model's performance across various disruption scenarios. This adaptive capability makes our approach particularly suitable for diverse island regions with varying operational risk profiles and infrastructure reliability patterns.

III. Results and Discussion

Our computational experiments evaluated the proposed framework using a test instance comprising 21 islands with 1-3 potential docks each and homogeneous waste generation patterns across demand points. We analyzed three distinct operational scenarios: a base case with all docks available, a medium disruption scenario where two random docks per island became unavailable (applied only to islands with three docks to maintain feasibility), and a severe disruption scenario with one random dock unavailable per island (affecting islands with two or three docks).

The results reveal critical insights about cost dynamics under uncertainty. The Pareto fronts demonstrate a consistent convex relationship between maritime transportation costs (MTC) and ground transportation costs (GTC) across all scenarios, with the trade-off curve becoming significantly steeper under disruption conditions. The dominated area metric (ΔDA) quantifies this effect, showing average solution quality degradation of 65.39% for medium disruptions and 98.09% for severe disruptions. The ΔDA reduction in severe disruption scenarios particularly highlights the vulnerability of island logistics systems to infrastructure failures.

While these findings demonstrate our framework's effectiveness in quantifying cost trade-offs and identifying robust solutions, they also reveal important limitations. Computational requirements grow exponentially for instances beyond 21 islands, suggesting the need for heuristic approaches in larger-scale applications. Additionally, our current synthetic data model does not account for spatial correlation in disruptions, such as weather events that might simultaneously affect multiple neighboring islands. The assumption of perfect demand information presents another opportunity for refinement in future work. The results provide valuable decision support for island logistics planning, particularly in demonstrating how different levels of infrastructure reliability impact overall system performance and cost structures. The framework's ability to maintain solution feasibility across disruption scenarios while clearly visualizing cost trade-offs offers practical utility for logistics planners operating in uncertain environments.

IV. Conclusion

This study presents a robust optimization framework for maritime logistics in island regions that effectively addresses infrastructure uncertainty while balancing maritime (MTC) and ground transportation costs (GTC). Our results demonstrate the framework's ability to maintain operational feasibility under significant disruptions, with solution quality declining nonlinearly as dock availability decreases (ΔDA = -65% to -98%). The clear trade-offs identified through Pareto analysis provide actionable insights for decision-makers in vulnerable island communities. While computational challenges remain for larger instances, the approach offers a valuable tool for planning resilient logistics networks. Future work will focus on incorporating spatial correlation in disruptions and developing scalable heuristic extensions to handle more complex archipelago configurations.

References

[1] Aharon Ben-Tal, Arkadi Nemirovski, and Laurent El Ghaoui. Robust Optimization. Princeton: Princeton University Press, 2009.

[2] Dimitris Bertsimas, David B Brown, and Constantine Caramanis. “Theory and applications of robust optimization”. In: SIAM Review 53.3 (2011),pp. 464–501.

[3] Dimitris Bertsimas and Melvyn Sim. “The price of robustness”. In: Operations Research 52.1 (2004), pp. 35–53.

[4] John R Birge and Francois Louveaux. Introduction to Stochastic Programming. Springer, 2011.

[5] Michel Gendreau, Gilbert Laporte, and Ren´ e S´ eguin. “An exact algorithmfor the vehicle routing problem with stochastic demands and customers”.In: Transportation Science 29.2 (1995), pp. 143–155.

[6] Pierre Hansen, Nenad Mladenovi´ c, and Dragan Uro˘sevi´ c. “Variable neigh borhood search and local branching”. In: Computers & Operations Research 33.10 (2006), pp. 3034–3045.

[7] Raka Jovanovic and Stefan Voß. “Fixed set search matheuristic applied to the knapsack problem with forfeits”. In: Computers & Operations Research 168 (2024), p. 106685.

[8] Richard M.Karp.“Reducibility among Combinatorial Problems”. In: Complexity of Computer Computations. Ed. by Raymond E. Miller and JamesW. Thatcher. Plenum Press, 1972, pp. 85–103.

[9] George Mavrotas and Kostas Florios. “An improved version of the augmented ε-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems”. In: Applied Mathematics and Computation 219.18 (2013), pp. 9652–9669.

[10] Pablo A. Miranda et al. “The bi-objective insular traveling salesman problem with maritime and ground transportation costs”. In: European Journal of Operational Research 271.3 (2018), pp. 1014–1036.

[11] Pablo A. Miranda-Gonzalez et al. “Exact formulation and analysis for the bi-objective insular traveling salesman problem”. In: Mathematics 9.21 (2021), p. 2641. doi: https://doi.org/10.3390/math9212641.

[12] Jean-Paul Rodrigue. The Geography of Transport Systems. Routledge, 2020.

[13] Lawrence V Snyder and Mark S Daskin. “Reliability models for facility location: the expected failure cost case”. In: Transportation Science 39.3 (2005), pp. 400–416.

[14] Ilgaz Sungur, Fernando Ord´onez, and Maged Dessouky. “A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty”. In: IIE Transactions 40.5 (2008), pp. 509–523. doi: https://doi.org/10.1080/07408170701745378.

[15] Bram Verweij et al. “The sample average approximation method applied to stochastic routing problems: a computational study”. In: Computational Optimization and Applications 24 (2003), pp. 289–333. doi: 10.1023/A:1021814225969.

[16] [16] Michelle Zambra-Rivera, Pablo A Miranda-Gonz´alez, and Carola A Blazquez. “A multiperiod household waste collection system for a set of rural islands with dynamic transfer port selection”. In: Optimization and Engineering 25.4 (2024), pp. 1779–1816. doi: 10.1007/s11081-023-09862-4

Session N°2 – Track N°2

OR Applications in Agriculture and Cities

Chair: Palominos, P. *(Universidad de Santiago de Chile)*
Place: G6-055
Time: 12:10 – 13:25

Asignación Dinámica de Trabajadores en Plantas de Procesamiento de Salmón: Modelado y Optimización

Time: 12:10 – 12:25
Authors:

- Romero-Ayala, O. *(ChR - Powering Operational Productivity)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*

Development of a Regional Planning and Mathematical Model Based on Water Resource Management: Limarí Province Case

Time: 12:30 – 12:45
Authors:

- Riffo-Carrasco, R. *(Universidad Católica del Norte)*
- Rojas-Castillo, V. *(Universidad Católica del Norte)*
- Monardes-Concha, C. *(Universidad Católica del Norte)*
- Avanzini, E. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Configuración de una Cadena de Suministro Corta de Alimentos Frescos Bajo una Perspectiva de Riesgos

Time: 12:50 – 13:05
Authors:

- Paredes-Rodríguez, A. *(Universidad del Valle)*
- Orejuela-Cabrera, J. *(Universidad del Valle)*
- Osorio-Gómez, J. *(Universidad del Valle)*

Modelo Predictivo para Estimar el Nivel de Desarrollo de las Smart Cities

Time: 13:10 – 13:25
Authors:

- Palominos, P. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Celedon, J. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Quezada, L. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Vargas, M. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Salomon, V. *(Universidade Estadual Paulista)*

Asignación Dinámica de Trabajadores en Plantas de Procesamiento de Salmón: Modelado y Optimización

1st Oscar Romero-Ayala
Founder & CTO – Research & Development
ChR Powering Operational Productivity
Puerto Montt, Chile
oscar.romero@chringenieria.cl

2nd Gabriel Gutiérrez-Jarpa
School of Industrial Engineering
PUCV
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl

3rd Pablo A. Miranda-González
Depto. Ing. Industrial
Univ. Católica del Norte
Antofagasta, Chile
pablo.miranda@ucn.cl

***Abstract*—La industria del salmón representa uno de los sectores más prometedores para abordar la creciente escasez de alimentos marinos. En este contexto, Noruega y Chile dominan la exportación de salmón, representando el 75% de la cuota de mercado. En Chile, las plantas procesadoras de salmón dependen fuertemente de una considerable fuerza laboral, lo que aporta beneficios económicos pero introduce incertidumbres y dificultades sustanciales. Los problemas de asignación de personal buscan soluciones eficientes para ayudar a los tomadores de decisiones en producción. En respuesta a estos desafíos, esta investigación propone un modelo de planificación de producción para optimizar los costos de setup, producción, inventario y mano de obra, abordando las preocupaciones de asignación de personal, particularmente relacionadas con los descansos obligatorios de salud. Un análisis de sensibilidad revela que las fluctuaciones en los costos de inventario, setup o mano de obra no impactan significativamente el costo total. El *gap* de optimalidad varía entre 3.22% y 8.37%, dependiendo de las fluctuaciones de la demanda.**

***Index Terms*—Gestión de Operaciones, Asignación de Recursos Humanos, Modelado de Optimización, Planificación de Producción**

I. Introducción

Los productos del mar están ganando reconocimiento creciente debido a su papel crucial en asegurar la seguridad alimentaria y la nutrición. No solo sirven como una fuente significativa de proteínas, sino que también ofrecen una gama diversa de ácidos grasos omega-3 esenciales y micronutrientes biodisponibles [1]. En este contexto, el salmón se destaca como uno de los productos más significativos, con los principales exportadores globales Noruega y Chile que representan en conjunto aproximadamente el 75% de las exportaciones, contribuyendo Chile con aproximadamente el 25% [2].

La producción de salmón se desarrolla a través de tres etapas secuenciales principales: Producción de Smolt, Cultivo Marino y Planta de Procesamiento. En la etapa inicial, el salmón comienza su vida en ambientes de agua dulce y progresa a través de pisciculturas y centros de smoltificación hasta alcanzar el peso mínimo para ser transferido al agua de mar. La segunda etapa involucra recibir smolts de tamaño y peso apropiados en centros de cultivo marino, donde son criados hasta alcanzar el peso comercial. Finalmente, los peces son transferidos a centros de recolección para la cosecha y posterior entrega a la planta de procesamiento.

En la etapa final, el salmón es procesado en líneas de producción para obtener productos como filetes, porciones, salmón ahumado y otros productos, que posteriormente son empaquetados para su distribución [3], [4]. Estas líneas de producción son críticas para satisfacer las demandas tanto de mercados de pescado fresco como congelado.

Una revisión de la literatura revela los desafíos relacionados con el balanceamiento de líneas de proceso continuo en plantas de producción. Varios estudios han abordado este problema utilizando diversas técnicas de optimización [5]–[9]. Sin embargo, existe una notable brecha en estudios específicos que aborden la asignación de recursos humanos dentro de la planificación de producción de salmón.

Dado estos desafíos, abordar la complejidad de la asignación de recursos humanos dentro de la industria del salmón es esencial, particularmente en lo que respecta a la rotación y movilidad del personal a través de líneas de procesamiento multi-etapa. Nuestra investigación busca cerrar esta brecha proponiendo un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) que optimiza tanto la distribución de personal como los costos operacionales.

II. Descripción del Problema

Es crucial reconocer que las industrias varían en su nivel de automatización, desde completamente automáticas hasta semi-automáticas o fuertemente dependientes de recursos humanos. En Chile, la industria del salmón se caracteriza por una dependencia significativa de mano de obra especializada. En nuestro caso específico, se utiliza una combinación de procesos semi-autónomos y trabajo manual.

El desafío principal radica en determinar la distribución óptima de personal para satisfacer eficientemente las demandas de producción especificadas por el departamento de ventas mientras se minimizan los costos. Los tomadores de decisiones enfrentan el desafío de asignar cada trabajador a una nueva

tarea después de un cierto período, siguiendo las regulaciones establecidas por la Asociación Chilena de Seguridad (AChS).

La producción de salmón exhibe mayor variabilidad debido a diferencias en el peso y tamaño de los peces, una característica menos común en otros productos. Además, la rotación de trabajadores debido a fatiga muscular puede no ser tan estrictamente necesaria en otras industrias. En la producción de salmón, no todos los productos pasan por los mismos procesos, lo que añade complejidad.

III. Metodología

La metodología empleada en este estudio se basa en el desarrollo y aplicación de un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para la asignación óptima de recursos humanos en la planificación de la producción de salmón. El proceso metodológico se estructura en las siguientes etapas:

A. Definición del problema y levantamiento de información

Se identificaron los principales procesos y líneas de producción en una planta de procesamiento de salmón en Chile, considerando tanto operaciones manuales como semi-automatizadas. Se recopilaron datos relevantes sobre la demanda, capacidades de línea, tiempos de proceso, tasas de producción por trabajador y restricciones normativas, como los descansos obligatorios establecidos por la Asociación Chilena de Seguridad (AChS).

B. Formulación matemática

El problema se modeló como un MILP, definiendo conjuntos, parámetros y variables de decisión que representan trabajadores, líneas, procesos, productos, turnos y segmentos de turno. La función objetivo busca minimizar el costo total, que incluye costos de setup, producción, inventario y mano de obra. Las restricciones aseguran la asignación adecuada de trabajadores, el cumplimiento de la demanda, la rotación de personal para evitar fatiga, y la capacidad mínima y máxima de cada proceso.

C. Implementación computacional

El modelo fue implementado en Python utilizando la API de AMPL y resuelto con el solver CPLEX 22.1.1.0. Se diseñaron instancias experimentales con diferentes niveles de demanda (baja: 4,000-5,000 unidades; media: 8,000-10,000 unidades; alta: 12,000-15,000 unidades) y se fijó un tiempo máximo de resolución de dos horas por instancia. Los experimentos se ejecutaron en un computador Intel® Core™ i9-12900H a 2.5GHz con 32GB de RAM, utilizando los 20 procesadores físicos disponibles.

D. Análisis de resultados y sensibilidad

Se evaluaron los resultados obtenidos en términos de costos, asignación de trabajadores y cumplimiento de la demanda. Además, se realizó un análisis de sensibilidad variando los principales parámetros de costo (setup, producción, inventario y mano de obra) en ±50% para identificar su impacto en la solución óptima y la robustez del modelo.

IV. Formulación Matemática

El modelo propuesto incorpora varios supuestos, incluyendo que la tasa de producción de los trabajadores permanece constante durante el bloque de tiempo de estudio, cada trabajador posee una tasa de producción distinta para cada proceso y línea de producción, y se aplica un tiempo promedio de producción para cada producto en cada proceso.

Sea K el conjunto de trabajadores disponibles, L el conjunto de líneas de proceso, P el número de procesos asociados con cada línea de producción, A el segmento de turnos durante el período de descanso, B el número de turnos realizados en un día, I los productos, T el turno del día, D el número de días considerados en un mes, y S el número de semanas proyectadas para cumplir la demanda.

La función objetivo minimiza los costos totales:

$$\begin{aligned}\text{Minimizar} = &\sum_{l\in L}\sum_{d\in D}\sum_{t\in\Omega_d}\sum_{a\in\Psi_t} CSetup^{l}\cdot YCF^{l}_{dta} \\ &+\sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{d\in D}\sum_{t\in\Omega_d}\sum_{a\in\Psi_t} Cproc^{il}\cdot Y^{il}_{dta} \\ &+\sum_{s\in S}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} CK_{st}\cdot YA^{k}_{st} \\ &+\sum_{s\in S}\sum_{i\in I} CInv^{i}_{s}\cdot Inv^{i}_{s}\end{aligned} \tag{1}$$

El modelo incluye restricciones para la asignación de trabajadores, movimiento de trabajadores entre procesos, capacidades mínimas y máximas de cada proceso, balance de inventario, y activación de líneas de producción. Las variables de decisión principales incluyen X^{dta}_{klp} (asignación de trabajador k al proceso p de la línea l en el segmento a del turno t del día d), Y^{dta}_{il} (cantidad del producto i procesado en la línea l), e Inv^{s}_{i} (inventario del producto i al final de la semana s).

V. Resultados

A. Análisis de Soluciones Óptimas

Para validar el modelo, se seleccionó una instancia menor para determinar la solución óptima del problema base. El tiempo computacional para obtener la solución óptima varió de 2.250 a 40.063 segundos, con un porcentaje de *gap* entre 0.00% y 0.0097407%.

Los resultados muestran que modificar los elementos de costo en la función objetivo no resulta en cambios significativos en la solución del problema base, ya que el costo total varía según las modificaciones específicas realizadas. Esta estabilidad ocurre porque los costos de producción son más altos que los otros costos involucrados en la función objetivo.

B. Resultados del Estudio de Caso

Se analizaron diferentes escenarios de demanda con límites de tiempo de resolución variables. Los resultados muestran que a medida que aumenta la demanda, el límite superior tiende a converger hacia una solución estable con diferencias mínimas o insignificantes. El *gap* de optimalidad varía entre 3.22% para demanda baja y 8.37% para demanda alta.

C. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó para seis escenarios de demanda de producción semanal, categorizados como baja, media y alta. Los resultados revelan que las fluctuaciones en los costos de inventario, setup o mano de obra, ya sea aumentando o disminuyendo, no impactan significativamente el costo total. Sin embargo, los costos de producción muestran un impacto sustancial en el costo total.

VI. Discusión

El modelo proporciona información valiosa para los tomadores de decisiones en varios dominios críticos. Facilita la asignación estratégica de trabajadores a procesos individuales y delinea su movimiento entre procesos durante cada segmento de turno. Esta información permite una coordinación efectiva de la gestión de recursos humanos basada en las asignaciones del modelo.

Desde una perspectiva de gestión de inventario, las percepciones del modelo son invaluables. Permite a los tomadores de decisiones evaluar la adecuación de la capacidad de la planta para avanzar la producción a través de las semanas, identificando potencial sobre o sub-utilización.

La aplicabilidad del modelo se extiende más allá de Chile y puede utilizarse en varias industrias y países donde una fuerza laboral significativa es esencial para la producción, como las industrias de procesamiento de aves, cerdo y otras carnes [10].

VII. Conclusiones

La alineación del modelo con las demandas del mercado, particularmente en la industria chilena del salmón, fue evidente por los valores de *gap* que van del 3.22% al 8.37%, dependiendo de la demanda. El análisis de sensibilidad reveló que las diferencias de *gap* resultantes de costos variables estaban vinculadas a soluciones relacionadas con la cantidad de producción basada en la demanda.

El trabajo de investigación logró exitosamente su objetivo principal de analizar procesos en la planta de producción de la industria del salmón en Chile para apoyar la toma de decisiones en la producción de salmón. Nuestro modelo propuesto representa una base importante para estudios futuros que pueden conectar líneas de procesamiento de salmón fresco y frío.

Las oportunidades de investigación futura incluyen analizar la línea de producción completa para evaluar el impacto de aumentos de capacidad, evaluar la línea de producción con indicadores de rendimiento alternativos, determinar la asignación óptima de personal para cada línea de proceso, y evaluar diseños alternativos de las líneas de proceso.

References

[1] FAO, "The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation," Rome, FAO, 2022.

[2] FAO, "Fishery and Aquaculture Statistics. Global aquaculture production 1950-2020," Rome, FAO, 2022.

[3] D. C. Millar and A. Gunn, "Fish processing technology," in *Fish Processing Technology*, Boston, MA: Springer, 1992, pp. 1-15.

[4] F. Asche and T. Bjørndal, "The economics of salmon aquaculture," 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011.

[5] S. U. Randhawa, "A heuristic-based computerized nurse scheduling system," *Computers & Operations Research*, vol. 21, no. 8, pp. 837-844, 1994.

[6] S. Kovalev, N. Mladenović, and F. Sibel Salman, "A variable neighborhood search for the multi-period collection of recyclable materials," *European Journal of Operational Research*, vol. 218, no. 2, pp. 435-449, 2012.

[7] M. Ritt, A. R. Costa, and P. O. A. Navaux, "Exact and heuristic algorithms for the assembly line worker assignment and balancing problem," *Computers & Operations Research*, vol. 54, pp. 153-175, 2015.

[8] C. G. S. Sikora, R. Lopes, and A. A. Chaves, "The traveling worker assembly line balancing problem with stochastic worker availability," *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 21, pp. 6314-6343, 2017.

[9] P. T. Zacharia and A. C. Nearchou, "A population-based algorithm for the bi-objective assembly line worker assignment and balancing problem," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 49, pp. 1-9, 2020.

[10] F. Asche, M. D. Smith, S. Oglend, A. J. Osmundsen, and T. C. Schrobback, "Salmon aquaculture: larger companies and increased production," *Aquaculture Economics & Management*, vol. 22, no. 2, pp. 148-166, 2018.

[11] P. Jensson, "Capacitated lot sizing to minimize inventory and setup costs," *Mathematical Programming*, vol. 46, no. 1-3, pp. 195-210, 1988.

[12] K. Bakhrankova, F. Midthun, and A. Uggen, "Stochastic optimization of operational production planning for fisheries," *Fisheries Research*, vol. 157, pp. 147-153, 2014.

[13] X. Wang, D. Li, and C. O'Brien, "Optimisation of traceability and operations planning: an integrated model for perishable food production," *International Journal of Production Research*, vol. 47, no. 11, pp. 2865-2886, 2019.

[14] S. Kim, J. Lee, and K. Park, "Mathematical model for ramp-up phase management in serial multistage production systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 220, pp. 107-118, 2020.

[15] S. Sayın and S. Karabatı, "A bicriteria approach to the two-machine flow shop scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 113, no. 2, pp. 435-449, 2007.

[16] A. Ammar, H. Pierreval, and S. Elmaghraby, "Assignment of operators to machines in manufacturing cells: a simulation study," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 239-251, 2012.

[17] Y. Mei, K. Tang, and X. Yao, "A memetic algorithm for periodic capacitated arc routing problem," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 41, no. 6, pp. 1654-1667, 2015.

[18] G. K. Kilincli Taskiran and M. Zhang, "Mathematical models and solution approach for cross-training staff scheduling at call centers," *Computers & Operations Research*, vol. 87, pp. 258-269, 2017.

[19] S. Bouajaja and N. Dridi, "A survey on human resource allocation problem and its applications," *Operational Research*, vol. 17, no. 2, pp. 339-369, 2017.

[20] E. F. Campana, D. Fasano, and A. Pinto, "Multi-objective optimization algorithms for assembly line worker assignment problems," *Computers & Operations Research*, vol. 132, pp. 105-118, 2021.

Development of a regional planning and mathematical model based on water resource management: Limarí Province Case

Rodrigo Riffo-Carrasco
School of Engineering
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
rodrigo.riffo@ce.ucn.cl

Valentina Rojas-Castillo
School of Engineering
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
valentina.rojas@ce.ucn.cl

Carlos A. Monardes-Concha
School of Engineering
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
cmonardes@ucn.cl

Elbio L. Avanzini
Industrial and Systems Engineering Department
Pontificia Universidad Católica de Chile
Av. Vicuña Mackenna 4860, 7820436, Macul, Metropolitan Region, Chile
elavanzini@uc.cl

***Abstract*—Water scarcity poses a significant challenge to sustainable development in arid agricultural regions. This paper presents a two-stage stochastic and multi-objective optimization model designed for regional planning under climate uncertainty. The model incorporates hydrological variability, economic objectives, and socio-demographic dynamics such as employment and migration. Applied to the Limarí Province in Chile, the model evaluates optimal water allocation strategies across various precipitation scenarios (low, medium, high), considering the integration of desalination technologies. The objectives include the Maximization of Agricultural Economic Benefit and the Maximization of Net Fiscal-Social Return. Results demonstrate the trade-off between profitability and territorial economic growth, highlighting the potential of the proposed framework to guide sustainable public policies. While the precipitation scenarios are generated through simulation rather than real-world validation, this approach enables the exploration of extreme hydrological conditions that are not always captured in historical records, providing a robust basis for stress-testing policy alternatives.This work contributes a replicable decision-support tool for policymakers facing the complex interplay of drought, rural economy, and environmental management, while also recognizing the practical challenges of implementation in real governance contexts.**

***Index Terms*—Stochastic Programming, Regional Planning, Water Resource Management, Climate Uncertainty, Multi-Objective Optimization.**

I. Introduction

Water scarcity is one of the most pressing challenges in regional planning, particularly in arid and semi-arid zones where climatic variability, increasing demand, and inadequate governance intersect. These constraints not only threaten ecological sustainability but also impact the socio-economic viability of rural territories. In this context, Operations Research (OR) emerges as a powerful methodology for structuring complex decision-making processes under uncertainty.

This study proposes a two-stage stochastic and multi-objective optimization model for regional agricultural planning under water constraints. Unlike traditional deterministic approaches, the model explicitly incorporates climatic variability and integrates economic and social criteria such as employment, migration, and regional attractiveness. This formulation supports territorial planning strategies aimed at promoting both economic resilience and equitable development.

The model accounts for multiple climate scenarios with associated probabilities, capturing the hydrological uncertainty faced by water-dependent agricultural systems. By combining economic optimization with social performance indicators, it enables the identification of trade-offs between agricultural profitability and regional fiscal-social returns.

Applied to the Limarí Province in Chile, a drought-prone agricultural region, the model demonstrates how integrated planning can guide adaptive policies. This work contributes to the design of sustainable development instruments by providing a replicable framework that supports robust water allocation and agricultural decisions under conditions of stress and limited resources.

II. Methodology

This research proposes a two-stage stochastic optimization model for regional agricultural planning under water scarcity and climate uncertainty. The model is formulated as a mixed-integer linear programming (MILP) problem, where the decision-making process is divided into two phases:

Identify applicable funding agency here. If none, delete this.

- **First stage (here-and-now):** Strategic decisions are made prior to knowing the actual hydrological scenario. These include the initial allocation of water by commune and crop, and the definition of cultivated area by crop type.
- **Second stage (wait-and-see):** Once the climatic scenario is revealed, corrective measures are applied. These include the adjustment of water allocations, the potential incorporation of desalinated water, and partial reconfiguration of cultivated areas to maintain economic and social viability.

The model captures the uncertainty in water availability by using a discrete set of climate scenarios—low, medium, and high precipitation—each with an associated probability derived from historical rainfall data (1995–2024). Gamma and Log-Normal probability distributions were fitted to each commune to simulate interannual variability and extreme events. These distributions were used to generate synthetic precipitation levels via Monte Carlo simulations and to compute empirical percentiles that define the scenarios.

The objective functions reflect key planning trade-offs:

1) **Maximization of Agricultural Economic Benefit**, which accounts for net profits from crop production after deducting costs, transportation, taxes, and labor.
2) **Maximization of Net Fiscal-Social Return**, which considers total agricultural remuneration and tax contributions minus public subsidies.

Water balance constraints are modeled at the regional level, incorporating surface and groundwater dynamics, recharge and discharge flows, and minimum ecological thresholds. Human consumption is guaranteed through a dedicated constraint that prioritizes drinking water supply, while agricultural use is subject to crop-specific requirements, land availability, and extraction limits.

The model also includes dynamic socio-economic components: population and migration are endogenously determined based on water availability and employment generation; employment depends on cultivated area and labor coefficients by crop; and an attractiveness index is computed to reflect the territory's ability to retain or attract population.

Uncertainty in water availability by using a discrete set of climate scenarios—low, medium, and high precipitation—each with an associated probability derived from historical rainfall data (1995–2024). Gamma and Log-Normal probability distributions were fitted to each commune to simulate interannual variability and extreme events. These distributions were used to generate synthetic precipitation levels via Monte Carlo simulations and to compute empirical percentiles that define the scenarios.

It is important to note that these scenarios are simulated rather than directly validated against observed climate projections. This methodological choice responds to the scarcity of reliable long-term hydrological records and the need to explore a broader spectrum of possible extreme conditions. While this approach provides flexibility for stress-testing planning policies, it also represents a limitation in terms of empirical validation, which should be addressed in future applications of the model.

The optimization is implemented in Python using the Gurobi solver. The planning horizon spans multiple years, allowing for an assessment of long-term strategies that promote sustainability, economic growth, and social resilience in the Limarí Province.

III. Problem Formulation

The proposed model is formulated as a two-stage stochastic mixed-integer linear program that optimizes water allocation and land use for agriculture under uncertainty. The first-stage decisions, taken before the climatic scenario is revealed, include the planned allocation of water by commune and crop, as well as the cultivated area. The second-stage decisions, executed after the scenario is known, adjust water allocations and cultivated areas while integrating additional resources like desalinated water.

The model considers a finite set of climate scenarios $\omega \in \Omega$, each associated with a probability p^{ω}. These scenarios are generated from probabilistic rainfall simulations (Gamma and Log-Normal distributions fitted at the commune level), representing interannual variability and extreme drought events. Although these scenarios are not direct replicas of observed historical sequences, they allow the model to explore a wide range of potential hydrological futures, strengthening the robustness of the resulting policies under uncertainty.

IV. Problem Formulation

The proposed model is formulated as a two-stage stochastic mixed-integer linear program. The first-stage decisions are made before knowing the climatic scenario, while the second-stage decisions are adaptive and incorporate the use of desalination infrastructure if needed.

A. Sets

- C: Set of crop types ($c \in C$).
- Z: Set of communes ($z \in Z$).
- $\mathcal{T}$: Set of periods ($t \in \mathcal{T}$).
- F: Set of water sources ($f \in F$).
- Ω: Set of climate scenarios ($\omega \in \Omega$).

B. Parameters

- $\pi_{c,t}$: Selling price of crop c in the year t per ton (USD).
- WRQ_c: Water requirement for crop c (m^3/ha).
- LR_c: Labor required per hectare for crop c (persons/hectare).
- AVA_z: Available area for cultivation in commune z (hectares).
- $IWSR_{2024,f}$: Initial surface water availability from source f in 2024 (m^3).
- RSR_f, RSB_f: Annual recharge of surface and subterranean water sources (m^3).
- DSR_f, DSB_f: Annual discharge of surface and subterranean water sources (m^3).
- $DT_{f,z}$: Distance between water source f and commune z (km).

- OPY_c: Optimal yield per hectare for crop type c. (t/ha)
- HWC_z: Annual human water consumption per person in commune z (m^3).
- MER_z: Minimum agricultural employment required in commune z (people).
- NPG_z: Natural population growth in commune z. (people)
- $POP_{2024,z}$: Population 2024 in commune z. (people)
- $GDPR_z$: Reference GDP of commune z (USD).
- AVR: Average agricultural remuneration (USD).
- $TAXR$: Tax factor for 19% VAT to calculate net value.
- RFC: Reference fiscal contribution based on the Chilean Internal Revenue Service (in USD).
- PCC_c: Cost per hectare of crop c (USD/hec)
- λ: Cost of agricultural water (USD/m^3).
- β: Productivity parameter for cultivated areas, normalized values ranging from 0 to 1.
- α: Weight for the objective function 1 (Z_1), i.e., agricultural economic benefit. This parameter is expressed as a percentage ranging from 0 to 1.
- T : maximum period in the planning horizon.

C. Decision Variables

All variables depend on ω, unless first-stage:

- $x^{\omega}_{f,c,z,t}$: Water allocated to crop c in commune z from water source f during period t (m^3).
- $y^{\omega}_{f,z,t}$: Water allocated for human consumption in commune z from water source f during period t (m^3).
- $ac_{c,z,t}$: Cultivated area for crop c in commune z during period t (hectares).
- $efy^{\omega}_{c,z,t}$: Effective yield of crop c in commune z during period t (tons).
- $wsr^{\omega}_{f,t}$: Available surface water in source f during period t (m^3).
- $wsb^{\omega}_{f,t}$: Available subterranean water in source f during period t (m^3).
- $pwu^{\omega}_{c,z,t}$: Proportion of water used for crop c in commune z during period t.
- $emp^{\omega}_{z,t}$: Total employment in commune z during period t (people).
- $pop^{\omega}_{z,t}$: Total population in commune z during period t (people).
- $mig^{\omega}_{z,t}$: Net migration in commune z during period t (people).
- $rem^{\omega}_{z,t}$: Total agricultural remuneration in commune z during period t (USD).
- $mai^{\omega}_{z,t}$: Mixed agricultural income in commune z during period t (USD).
- $tax^{\omega}_{z,t}$: Taxes generated in commune z during period t (USD).
- $sbs^{\omega}_{z,t}$: Agricultural subsidies in commune z during period t (USD).
- $inc^{\omega}_{c,z,t}$: Income generated from crop c in commune z during period t (USD).
- $prf^{\omega}_{z,t}$:
- $gdp^{\omega}_{z,t}$: Nominal agricultural GDP in commune z during period t (USD).

D. Objective Functions

1. **Maximization of Agricultural Economic Benefit:**

$$\text{Max } Z_1 = \sum_{c\in C}\sum_{z\in Z}\sum_{t\in T} \text{prf}_{c,z,t}$$

2. **Maximization of Net Fiscal-Social Return:**

$$\text{Max } Z_2 = \sum_{z\in Z}\sum_{t\in T} (\text{rem}_{z,t} + \text{tax}_{z,t} - \text{sbs}_{z,t})$$

3. **Combined Objective Function:**

$$F = \alpha \cdot Z_1 + (1-\alpha)\cdot Z_2$$

E. Model Constraints

$$\sum_{f\in\mathcal{F}} x_{f,c,z,t} \le \text{WRQ}_c \cdot \text{ac}_{c,z,t}, \quad \forall c\in\mathcal{C},\ z\in\mathcal{Z},\ t\in\mathcal{T} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} wsup_{f,t+1} = wsup_{f,t} + \text{WPREC}_{f,t} + \text{RSR}_f \\ - \sum_{c\in\mathcal{C}}\sum_{z\in\mathcal{Z}} x_{f,c,z,t} - \sum_{z\in\mathcal{Z}} y_{f,z,t} - \text{DSR}_f, \\ \forall f\in\mathcal{F},\ t\in\mathcal{T}\setminus\{T\} \end{aligned} \tag{2}$$

$$costpt_{z,t} = \sum_{c\in\mathcal{C}} ac_{c,z,t}\cdot PCC_c, \qquad \forall z\in\mathcal{Z},\ t\in\mathcal{T} \tag{3}$$

$$wsup_{f,t} \ge 0.2\cdot \text{RSR}_f, \qquad \forall f\in\mathcal{F}^{\text{sup}},\ t\in\mathcal{T} \tag{4}$$

$$\sum_{c\in\mathcal{C}}\sum_{z\in\mathcal{Z}} x_{f,c,z,t} + \sum_{z\in\mathcal{Z}} y_{f,z,t} \le L_f, \quad \forall f\in\mathcal{F},\ t\in\mathcal{T} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} wsub_{f,t+1} = wsub_{f,t} + RSB_f - \sum_{c\in\mathcal{C}}\sum_{z\in\mathcal{Z}} x_{f,c,z,t} \\ - \sum_{z\in\mathcal{Z}} y_{f,z,t} - DSB_f, \\ \forall f\in\mathcal{F},\ t\in\mathcal{T}\setminus\{T\} \end{aligned} \tag{6}$$

$$wsub_{f,t} \ge 0.2\cdot RSB_f, \qquad \forall f\in\mathcal{F},\ t\in\mathcal{T} \tag{7}$$

$$wtotal_{f,t} = wsup_{f,t} + wsub_{f,t}, \qquad \forall f\in\mathcal{F},\ t\in\mathcal{T} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} ac_{c,z,t+1} = ac_{c,z,t} + \delta_c \cdot \left(\frac{\sum_{f\in\mathcal{F}} x_{f,c,z,t}}{\text{WRQ}_c}\right), \\ \forall c\in\mathcal{C},\ z\in\mathcal{Z},\ t\in\mathcal{T}\setminus\{T_{\max}\} \end{aligned} \tag{9}$$

$$ac_{c,z,t+1} \le \text{AVA}_z, \quad \forall c\in\mathcal{C},\ z\in\mathcal{Z},\ t\in\mathcal{T}\setminus\{T_{\max}\} \tag{10}$$

$$efy_{c,z,t} = OPY_c, \quad \forall c \in \mathcal{C},\ z \in \mathcal{Z},\ t < 2024 + TRESP_c \tag{11}$$

$$efy_{c,z,t} = \left(\sum_{f\in\mathcal{F}} x_{f,c,z,t}\right) \cdot \left(\frac{OPY_c \cdot \beta}{WRQ_c}\right) + \left(\sum_{f\in\mathcal{F}} x_{f,c,z,t-TRESP_c}\right) \cdot \left(\frac{OPY_c \cdot \beta}{WRQ_c}\right) \tag{12}$$

$$migr_{z,t} = pop_{z,t} - pop_{z,t-1}, \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} :\ t > 2024 \tag{13}$$

$$pop_{z,t+1} = pop_{z,t} + migr_{z,t} + NPG_z \cdot pop_{z,t}, \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \setminus \{T_{\text{final}}\} \tag{14}$$

$$emp_{z,t} \le \phi \cdot pop_{z,t}, \qquad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{15}$$

$$emp_{z,t} = \sum_{c\in\mathcal{C}} ac_{c,z,t} \cdot LR_c, \qquad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{16}$$

$$emp_{z,t} \ge MER_z, \qquad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{17}$$

$$trc_{z,t} = \lambda \sum_{c\in\mathcal{C}} \sum_{(f,z)\in\mathcal{FZ}} DT_{f,z} \cdot x_{f,c,z,t}, \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{18}$$

$$inc_{c,z,t} = efy_{c,z,t} \cdot \pi_{c,t}, \quad \forall c \in \mathcal{C},\ z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{19}$$

$$rem_{z,t} = emp_{z,t} \cdot AVR, \qquad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{20}$$

$$tax_{z,t} = TAXR \cdot \sum_{c\in\mathcal{C}} inc_{c,z,t} + 0.01 \cdot RFC \cdot \sum_{c\in\mathcal{C}} ac_{c,z,t}, \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{21}$$

$$prf_{z,t} = \sum_{c\in\mathcal{C}} inc_{c,z,t} - trc_{z,t} - costpt_{z,t} - tax_{z,t} - rem_{z,t}, \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{22}$$

$$atr_{z,t} = \frac{1}{4}\left[\kappa_1 \cdot \frac{emp_{z,t}}{MER_z} + \kappa_2 \cdot \frac{\sum_{c\in\mathcal{C}} acu_{c,z,t} \cdot WRQ_c}{WRF_z} + \kappa_3 \cdot \frac{\sum_{f\in\mathcal{F}}\sum_{c\in\mathcal{C}} x_{f,c,z,t} + \sum_{f\in\mathcal{F}} y_{f,z,t}}{WRF_z}\right], \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \setminus \{t_0\} \tag{23}$$

$$\sum_{f\in\mathcal{F}} y_{f,z,t} \ge 0.65 \cdot HWC_z \cdot pop_{z,t}, \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{24}$$

$$\sum_{f\in\mathcal{F}} y_{f,z,t} \le HWC_z \cdot pop_{z,t}, \qquad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{25}$$

$$(1-\rho) \cdot \sum_{f\in\mathcal{F}} \sum_{c\in\mathcal{C}} x_{f,c,z,t} \ge \rho \cdot \sum_{f\in\mathcal{F}} y_{f,z,t}, \quad \forall z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{26}$$

$$inc_{c,z,t} \ge \lambda \cdot \sum_{f\in\mathcal{F}} DT_{f,z} \cdot x_{f,c,z,t}, \quad \forall c \in \mathcal{C},\ z \in \mathcal{Z},\ t \in \mathcal{T} \tag{27}$$

V. Case Study

The proposed model is applied to the Limarí Province, located in the Coquimbo Region of north Chile. This province comprises five communes—Ovalle, Monte Patria, Combarbalá, Punitaqui, and Río Hurtado—and is characterized by a semi-arid climate with high interannual variability in precipitation. Agriculture is the main economic activity and source of employment, with high-value crops such as table grapes, avocados, and citrus fruits being dominant.

Over the last two decades, the region has experienced a sustained decrease in annual rainfall, estimated at 30% combined with increased agricultural and urban water demands. This situation has led to overexploitation of aquifers, reduced reservoir levels (operating at only 20% of historical capacity), and higher competition for scarce water resources.

To address these challenges, the proposed model incorporates commune-level data on water availability, land use capacity, crop water needs, labor coefficients, and demographic dynamics. Historical precipitation records from 1995 to 2024 were used to construct a stochastic representation of climatic variability. Gamma and Log-Normal distributions were fitted to model commune-specific rainfall regimes, and scenario probabilities were estimated through Monte Carlo simulation. The resulting hydrological scenarios low (80%), medium (15%), and high (5%) capture both typical and extreme drought conditions.

VI. Results and Discussion

The model provides a structured decision-support framework for evaluating water allocation and agricultural planning strategies under different climate scenarios. By incorporating both economic and social objectives, it allows planners to explore the trade-offs between maximizing profitability and enhancing fiscal-social returns.

One of the main insights is the clear tension between agricultural economic benefit and territorial equity. Prioritizing

economic performance leads to concentration of activity in more productive communes, whereas emphasizing fiscal-social returns promotes a more balanced regional development. This reflects the policy dilemma between efficiency and equity, which is central to sustainable planning.

The model also demonstrates the role of adaptive measures, such as the integration of desalinated water, in mitigating the impacts of prolonged drought. In scenarios with low precipitation, desalination becomes a key strategy to maintain crop viability and reduce population displacement. Additionally, the endogenous representation of migration and employment provides valuable indicators for anticipating socio-territorial impacts.

Scenario analysis highlights the sensitivity of agricultural output and population dynamics to climatic variability. The use of historical data to generate probabilistic scenarios enables planners to stress-test policy options and identify robust strategies under uncertainty.

An additional consideration relates to the applicability of the proposed framework in real-world policy contexts. Although the model demonstrates the potential of desalination and adaptive water allocation to mitigate extreme drought conditions, its implementation would face several practical challenges. These include the high investment and operational costs of desalination plants, institutional coordination among communes for equitable water distribution, and the need for governance mechanisms that align agricultural incentives with sustainability goals. Moreover, farmers' resistance to changes in crop allocation or water rights could limit the effectiveness of the strategies. Recognizing these challenges is essential to situate the model not only as a theoretical contribution but also as a basis for informed dialogue between policymakers, communities, and stakeholders.

REFERENCES

[1] Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (1999). Sustainability of ground-water resources (Vol. 1186). US Geological Survey. https://doi.org/10.3133/cir1186

[2] Boisier, J. P. (2024). Water scarcity in the Coquimbo region. Water Science Review, 34(2), 225-236.

[3] Bolognesi, A., Capobianchi, P., & Vivacqua, F. (2013). Energy optimization in water supply systems: A comprehensive model for reducing energy consumption. Journal of Water Resources Planning and Management, 139(6), 588-594. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000291

[4] CEAZA. (2024). Boletín climático: Octubre 2024. Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas. https://www.ceaza.cl

[5] Climate Data Guide. (2023). Niño SST Indices (ONI and TNI). National Center for Atmospheric Research. https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni

[6] ERD Coquimbo. (2024). Estrategia Regional de Desarrollo 2030. Gobierno Regional de Coquimbo.

Configuración de una cadena de suministro corta de alimentos frescos bajo una perspectiva de riesgos

Andrés Mauricio Paredes Rodríguez
Escuela de ingeniería industrial
Universidad Del Valle
Cali, Colombia.
andres.paredes@correounivalle.edu.co

Juan Pablo Orejuela Cabrera
Escuela de ingeniería industrial
Universidad Del Valle
Cali, Colombia
juan.orejuela@correounivalle.edu.co

Juan Carlos Osorio Gómez
Escuela de ingeniería industrial
Universidad Del Valle
Cali, Colombia
juan.osorio@correounivalle.edu.co

***Resumen*— Las cadenas de suministro de alimentos frescos son fundamentales para garantizar la soberanía alimentaria, especialmente en países en desarrollo, ya que aseguran la disponibilidad de productos mediante una adecuada planificación de cultivos y una distribución eficiente. Entre las decisiones más importantes se encuentran la selección de los cultivos y la asignación de flujos hacia los principales clientes. Estas decisiones están condicionadas por riesgos durante la cosecha, que reducen la oferta disponible, y por la volatilidad de los precios, que afecta el flujo de caja de los agricultores y amenaza su estabilidad financiera. Este estudio propone un modelo de programación lineal entera mixta para diseñar una cadena de suministro corta conformada por una asociación de pequeños productores y un conjunto de clientes. El modelo aborda simultáneamente la selección de cultivos y la asignación de flujos dentro de un horizonte de planificación, con el fin de maximizar el flujo de caja total de la asociación. Los resultados destacan la conformación de una cartera de cultivos robusta, capaz de estabilizar los ingresos y mitigar riesgos asociados tanto a la cosecha como a las fluctuaciones de precios. Además, el modelo ofrece lineamientos para la distribución óptima de productos, contribuyendo al fortalecimiento de cadenas cortas más resilientes y equitativas.**

Palabras claves— Diseño, pequeños agricultores, cadenas de suministro agroalimentarias, optimización, riesgos.

Modelo predictivo para estimar el nivel de desarrollo de las Smart Cities

Pedro Palominos
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
pedro.palominos@usach.cl

Jaime Celedon
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
jaime.celedon@usach.cl

Luis Quezada
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
luis.quezada@usach.cl

Manuel Vargas
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
manuel.vargas@usach.cl

Valerio Salomon
Departamento de Producción
Universidad Estadual Paulista
São Paulo, Brasil
valerio.salomon@unesp.br

***Abstract*— Este estudio propone un modelo predictivo de regresión lineal múltiple para explicar el desempeño de 103 ciudades de 50 países en el IESE Cities in Motion Index (CIMI). A partir de seis hipótesis asociadas a ejes clave de Smart City — tecnologías de la información y comunicación (TIC), población, Índice de Progreso Social (IPS), turismo, desempleo y diferencias regionales—, estimamos especificaciones progresivas y seleccionamos un modelo interactivo con efectos fijos por continente e interacción Población × continente. El modelo final alcanza R^2-ajustado = 0,781 y explica el 79,7% de la variabilidad del CIMI, con TIC como factor más influyente, seguido de población, IPS, turismo y un efecto negativo del desempleo. Los supuestos OLS se verifican mediante diagnósticos de normalidad y homocedasticidad con errores robustos (HC3); la colinealidad se mantiene en rangos convencionales y se controlan observaciones influyentes. Para mitigar posible endogeneidad (TIC↔CIMI), se delineó un enfoque 2SLS con instrumentos relevantes (inversión histórica en telecomunicaciones y penetración móvil rezagada), con verificación de validez reportada en material suplementario. En términos de gestión, el modelo orienta prioridades de inversión en conectividad digital, capital humano y dinamismo económico-turístico, y permite extrapolar diagnósticos hacia ciudades no cubiertas por rankings internacionales. En conjunto, los resultados sugieren que la digitalización actúa como habilitador transversal del desempeño urbano, pero su impacto se potencia en contextos con mayor escala poblacional, progreso social y actividad turística, lo que demanda políticas integrales y sensibles a la heterogeneidad regional.**

Keywords— Smart City, CIMI, regresión lineal múltiple, TIC.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Session N°2 – Track N°3

OR Applications in Supply Chain

Chair: Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
Place: G6-056
Time: 12:10 – 13:25

On the Estimation of a Markov Choice Model from Partial Inventory Data

Time: 12:10 – 12:25
Authors:

- Thraves, C. *(Universidad de Chile)*
- Vulcano, G. *(Universidad Torcuato di Tella)*
- Vidal, I. *(Universidad de Chile)*

Modelo Matemático para la Toma de Decisiones Sostenibles en una Cadena de Suministro de Madera Sólida Chilena bajo Conflicto Territorial

Time: 12:30 – 12:45
Authors:

- Mena-Reyes, J. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Soto-Concha, R. *(Universidad de Los Lagos)*
- Vergara, F. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Ortiz-Araya, V. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Willmer-Escobar, J. *(Universidad del Valle)*
- Linfati, R. *(Universidad del Bío-Bío)*

Multi-objective Optimization of Biomass Procurement with Supplier Diversification and Contractual Flexibility

Time: 12:50 – 13:05
Author: Muñoz, F. *(Universidad del Bío-Bío)*

Un Modelo de Localización con Inventario con Selección de Políticas de Control de Inventario Capacitado y Multi-producto

Time: 13:10 – 13:25
Authors:

- Martínez-Godoy, I. *(Universidad Católica del Norte)*
- Peralta-González, J. *(Universidad Católica del Norte)*
- Inostroza-Leon, M. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*

On the Estimation of a Markov Choice Model from Partial Inventory Data

Charles Thraves
Department of Industrial Engineering
University of Chile
Santiago, Chile
cthraves@dii.uchile.cl

Gustavo Vulcano
School of Business
Universidad Torcuato di Tella
Buenos Aires, Argentina
gvulcano@utdt.edu

Iván Vidal
Department of Industrial Engineering
University of Chile
Santiago, Chile
ivan.vidal@ug.uchile.cl

***Abstract*—A seller observes inventory levels of substitute products at the beginning and end of each day, over multiple days. Each day, customers arrive sequentially and either purchase one product or choose the no-purchase option (modeled as an additional product). Each customer has a probability distribution over first-choice preferences, and if their preferred product is unavailable, they transition to another option according to a Markov chain discrete choice model. The total number of arriving customers is known, but neither the specific product purchased by each customer nor the choice set they faced is observed. Therefore, this work extends previous studies by relying on less information about customer behavior and observed outcomes. We use the Expectation-Maximization (EM) algorithm to estimate the model parameters, employing MCMC in the E-step to sample purchase paths consistent with the inventory observations. The M-step admits closed-form solutions. We solve numerical instances to evaluate the accuracy and performance of the estimated parameters. Our results indicate that, although the true parameters are not always identifiable, the log-likelihood attained using the estimated parameters is very similar to that of the true parameters. This holds as well when evaluating simulated data in terms of final inventories, stock-out probabilities, and fill rates.**

***Index Terms*—Expectation-Maximization, Markov Chain Choice Model, Inventory Modeling, Parameter Estimation, Metropolis-Hastings**

I. Introduction

We study the problem of estimating customer choice behavior from partial inventory data in a multi-product environment. In this setting, a seller offers a set of substitutable products over a finite time horizon of T days. At the beginning and end of each day, the seller observes the inventory levels of each product. However, detailed transaction-level data—such as which product each customer purchased or what choice set they faced—is unavailable.

Each day, a known number of customers arrive sequentially and either purchase one product or opt for a no-purchase alternative, which is modeled as an additional product. Customers have probabilistic preferences over first-choice products. If their preferred item is out of stock, they transition to other available products according to a Markov chain discrete choice model.

Identify applicable funding agency here. If none, delete this.

The Markov chain choice model was introduced by Blanchet et al. (2013) [1]. Their model captures customer substitution behavior by representing transitions between products as a Markov chain. Originally, it was proposed in the context of assortment optimization problems, where the objective is to select a subset of products to maximize expected revenue. Şimşek and Topaloglu (2018) [2] developed an expectation-maximization (EM) algorithm to estimate it's parameters.

This framework differs from standard choice modeling approaches, which assume complete purchase records or individual-level data. Instead, we rely solely on daily beginning and ending inventory records and customer counts. This setup is based on practical situations where transaction details are not recorded, but stock levels are reliably monitored.

The goal is to estimate the underlying choice model parameters: a first-choice probability vector λ and a transition matrix ρ, governing the substitution behavior. To achieve this, we develop a method based on the Expectation-Maximization (EM) algorithm, where the E-step uses Markov Chain Monte Carlo (MCMC)—specifically the Metropolis-Hastings algorithm—to sample purchase paths consistent with the observed inventory data. The M-step then updates parameter estimates using closed-form expressions derived from the complete-data log-likelihood.

We validate our method through numerical experiments, demonstrating that even when model parameters are not uniquely identifiable, the estimated parameters yield similar log-likelihood values and predictive metrics such as fill rates and stock-out probabilities.

II. Model Description

A. Problem Setting

We consider a seller managing a finite inventory of I substitutable products, indexed by the set $\mathcal{I} = \{1, \dots, I\}$, over a time horizon of T days. Each day, a total of C_t customers arrive sequentially. For each product i and day t, the seller observes the starting inventory $n_t^{(s)} \in \mathbb{Z}_+^I$ and the ending inventory $n_t^{(f)} \in \mathbb{Z}_+^I$. The no-purchase option is included as one of the products. No information is available about which products individual customers choose, nor the sequence in which products are depleted.

Each customer either purchases a product or opts for a no-purchase alternative, which we treat as an additional product. Customers have a first-choice preference distribution $\lambda \in \mathbb{R}^I$ with $\sum_{i=1}^{I} \lambda_i = 1$, $\lambda_i \geq 0$, and follow a Markov chain substitution model characterized by a transition matrix $\rho = \{\rho_{ij}\}_{i,j=1}^{I}$ where $\sum_{j=1}^{I} \rho_{ij} = 1$, $\rho_{ij} \geq 0$.

B. Unobserved Variables

To model the hidden decision process of each customer c on day t, we define:

- F_{tci}: a Bernoulli variable indicating whether product i is the first choice of customer c on day t.
- X_{tcij}: the number of times customer c transitions from product i to product j on day t.

We also define, the set of available items can be computed as:

$$S_{tc}(z) = \left\{ i \in \mathcal{I} | n_{ti}^{(s)} - \sum_{c'=1}^{c-1} \mathbb{1}_{\{z_{c'}=i\}} \right\}. \tag{1}$$

C. Likelihood Function

Let λ and ρ denote the model parameters. The complete log-likelihood for the observed and hidden data is:

$$L_C(\lambda, \rho) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{c=1}^{C_t} \left(\sum_{i=1}^{I} f_{tci} \log \lambda_i + \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{I} x_{tcij} \log \rho_{ij} \right) \tag{2}$$

where f_{tci} and x_{tcij} denote the realizations of the random variables F_{tci} and X_{tcij}, respectively.

Since only initial and final inventories are observed, we work instead with the incomplete likelihood:

$$L_I(\lambda, \rho) = \sum_{t=1}^{T} \log \mathbb{P}(N_t^{(f)} = n_t^{(f)} \mid N_t^{(s)} = n_t^{(s)}, \lambda, \rho) \tag{3}$$

where $N_t^{(f)}$ and $N_t^{(s)}$ denote the random variables corresponding to the final and initial inventory vectors on day t, respectively.

To estimate λ and ρ, we adopt the Expectation-Maximization (EM) algorithm, which is described in detail in the following sections.

III. Expectation-Maximization Algorithm

To estimate the parameters of the Markov choice model from partial inventory data, we employ the Expectation-Maximization (EM) algorithm. This approach iteratively estimates the latent variables and updates the model parameters λ and ρ to maximize the observed-data log-likelihood.

A. Overview of the EM Approach

Let $\lambda^{(0)}$ and $\rho^{(0)}$ denote randomly generated initial values for the first-choice probabilities and the transition matrix, respectively. At each iteration l, the EM algorithm consists of the following steps:

- **E-Step**: Compute the expected values of the latent variables using the current parameters $\lambda^{(l)}$, $\rho^{(l)}$.
- **M-Step**: Maximize the expected incomplete log-likelihood with respect to λ and ρ.

Due to the intractability of computing expectations over all possible purchase paths in the E-step, we use Metropolis-Hastings (MH), a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method, to generate purchase-path samples that are consistent with the observed inventory data.

B. Latent Variables

The unobserved variables include:

- F_{tci}: A Bernoulli variable indicating if customer c on day t selected product i as their first choice.
- X_{tcij}: A variable denoting the number of transitions from product i to product j by customer c on day t.

C. E-Step with MCMC Sampling

We note each day admits exponentially many purchase paths consistent with the observed final inventory. To approximate them, we use MCMC to generate a subset $\mathcal{Z}_t \subset \Omega_t$ of L sampled paths from the full set Ω_t. A purchase path is a sequence $\mathcal{Z}_t = \{(z_1^{(l)}, \ldots, z_{C_t}^{(l)})\}_{l=1}^{L}$, where $z_c^{(l)} = i$ if customer c in sample l buys product i. Let Z_{tc} be the random variable for the product purchased by customer c on day t, with $Z_t = (Z_{t1}, \ldots, Z_{tC_t}) \in \mathcal{I}^{C_t}$. For each path z, we also track the available set $S_{tc}(z)$ faced by customer c.

Using these samples, we approximate:

$$\hat{F}_{tci} \approx \frac{1}{|\mathcal{Z}_t|} \sum_{z \in \mathcal{Z}_t} \frac{\Psi_{z_c}(i, S_{tc}(z)) \cdot \lambda_i}{\Theta_{z_c}(S_{tc}(z))}$$

where, following the notation introduced by Simsek and Topaloglu [2], $\Theta_i(S)$ denotes the expected number of times that product i is visited by a customer who is presented with the set of available items $S \subseteq \mathcal{I}$. Similarly, $\Psi_k(i, S)$ represents the probability that a customer purchases product k given that the available set is $S \subseteq \mathcal{I}$ and that product i is their first choice.

Similarly, for each transition pair (i, j), we compute:

$$\hat{X}_{tcij} \approx \frac{\rho_{ij}}{|\mathcal{Z}_t|} \sum_{z \in \mathcal{Z}_t} \frac{\Psi_{z_c}\big(j, S_{tc}(z)\big) \cdot \mathbb{1}_{\{i \notin S_{tc}(z)\}} \cdot \Theta_i(S_{tc}(z))}{\Theta_{z_c}(S_{tc}(z))}$$

D. Metropolis-Hastings Sampling

We use a Metropolis-Hastings (MH) algorithm to generate purchase-path samples consistent with the observed initial and final inventories. For day t, we start from an initial configuration $z^{(0)} \in \mathcal{I}^{C_t}$, where $z_c^{(0)} = i$ if customer c purchases product i. At iteration k, let $z^{(k)}$ denote the current purchase-path. A proposal $z^{(p)}$ is obtained by selecting two customers at random and swapping their purchased items.

The acceptance probability is determined by the ratio of the probabilities of the proposed and current purchase-paths:

$$\alpha = \min \left\{ 1, \frac{g_t(z^{(p)})}{g_t(z^{(k)})} \right\}, \tag{4}$$

where $g_t(z)$ denotes the probability of path z, given by

$$g_t(z) := \prod_{c'=1}^{C_t} \Theta_{z_{c'}}\big(S_{tc'}(z)\big). \tag{5}$$

Since all neighboring purchase-paths are equally likely to be proposed in either direction, the proposal terms cancel out.

Iterating this process yields a Markov chain whose retained states $\{z^{(1)}, \ldots, z^{(L)}\}$ form a sample of feasible purchase-paths, which are then used to estimate $\hat{F}_{tci}$ and $\hat{X}_{tcij}$.

E. M-Step Updates

Given the expected values $\hat{F}_{tci}$ and $\hat{X}_{tcij}$, we compute the updated parameters as:

$$\lambda_i^{(l+1)} = \frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{C_t} \hat{F}_{tci}}{\sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{C_t}\sum_{i'=1}^{I} \hat{F}_{tci'}} \tag{6}$$

$$\rho_{ij}^{(l+1)} = \frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{C_t} \hat{X}_{tcij}}{\sum_{t=1}^{T}\sum_{c=1}^{C_t}\sum_{j'=1}^{I} \hat{X}_{tcij'}} \tag{7}$$

F. Stopping Criterion

The EM algorithm is iterated until the increase in the incomplete log-likelihood becomes negligible. Let $L_I^{(l)}$ be the incomplete log-likelihood at iteration l. Then the convergence criterion is:

$$|L_I^{(l+1)} - L_I^{(l)}| < \epsilon$$

where $\epsilon > 0$ is a small predefined threshold. Since the incomplete log-likelihood is guaranteed to increase (or remain constant) at each iteration of the EM algorithm, this criterion ensures monotonic convergence.

IV. Performance Metrics

To evaluate quantify how well these estimates explain unseen data and how they are able to generalize the results, we use the following out-of-sample (OOS) metrics, $i.e.$ on periods $\mathcal{T}_{\text{OOS}} \subset \{1, \ldots, T\}$ that were not used for estimation.

- **Out-of-sample log-likelihood (LL_{OOS}):** Generalization to unseen data.

$$\text{LL}_{\text{OOS}} = \sum_{t \in \mathcal{T}_{\text{OOS}}} \log \mathbb{P}(N_t^{(f)} = n_t^{(f)} \mid N_t^{(s)}).$$

- **Final inventory errors ($\text{MAE}_{N_f}, \text{MAD}_{N_f}$):** Shelf-level accuracy in matching stock outcomes.

$$\text{MAE}_{N_f} = \tfrac{1}{|\mathcal{T}_{\text{OOS}}|(I-1)} \sum_{t,i} \big|\mathbb{E}_{\lambda,\rho}[n_{ti}^{(f)}] - \mathbb{E}_{\hat{\lambda},\hat{\rho}}[n_{ti}^{(f)}]\big|,$$

$$\text{MAD}_{N_f} = \tfrac{1}{|\mathcal{T}_{\text{OOS}}|(I-1)} \sum_{t,i} \big|n_{ti}^{(f)} - \mathbb{E}_{\hat{\lambda},\hat{\rho}}[n_{ti}^{(f)}]\big|.$$

- **Zero-inventory errors ($\text{MAE}_{\text{I0}}, \text{MAD}_{\text{I0}}$):** Accuracy in reproducing stockouts.

$$\text{MAE}_{\text{I0}} = \tfrac{1}{|A|} \sum_{(t,i)\in A} \big|\Pr_{\lambda,\rho}(n_{ti}^{(f)} = 0) - \Pr_{\hat{\lambda},\hat{\rho}}(n_{ti}^{(f)} = 0)\big|,$$

$$\text{MAD}_{\text{I0}} = \tfrac{1}{|A|} \sum_{(t,i)\in A} \big|\mathbb{1}_{\{n_{ti}^{(f)}=0\}} - \Pr_{\hat{\lambda},\hat{\rho}}(n_{ti}^{(f)} = 0)\big|.$$

- **Stockout-rate error (MAE_{SO}):** Difference in no-purchase behavior due to stockouts.

$$\text{MAE}_{\text{SO}} = \tfrac{1}{|\mathcal{T}_{\text{OOS}}|} \sum_{t} \big|\mathbb{E}_{\lambda,\rho}[f_t] - \mathbb{E}_{\hat{\lambda},\hat{\rho}}[f_t]\big|.$$

- **Kolmogorov-Smirnov distance** (KS)**:** Distributional similarity of purchases.

$$\text{KS} = \tfrac{1}{|\mathcal{T}_{\text{OOS}}|(I-1)} \sum_{t,i} \sup_x \big|F^{(\lambda,\rho)}_{N_{ti}^{(f)}}(x) - F^{(\hat{\lambda},\hat{\rho})}_{N_{ti}^{(f)}}(x)\big|.$$

- **Parameter error:** Deviation of estimated parameters from ground truth.

$$\tfrac{1}{I}\sum_i |\hat{\lambda}_i - \lambda_i|, \quad \tfrac{1}{(I-1)^2}\sum_{i\neq j} |\hat{\rho}_{ij} - \rho_{ij}|.$$

V. Discussion

A. Identifiability.

An inherent limitation of the proposed estimation framework is that the model parameters (λ, ρ) are not always identifiable, since different combinations can generate statistically indistinguishable inventory trajectories. Thus, we aim not to recover the true parameters, but estimates that reproduce similar outcomes. To assess this, we simulate purchase paths under both true and estimated parameters and compare their resulting inventory distributions on out-of-sample days, focusing on predictive performance rather than exact parameter recovery.

B. Validation with Real Data.

Beyond simulated data, we validate the method using the hotel booking dataset of Bodea et al. (2009), also employed by van Ryzin and Vulcano (2015). The data, which records bookings by room type, are preprocessed to reduce sparsity by discarding infrequent products and adding no-purchase records. This benchmark, as in Şimşek and Topaloglu [2], enables evaluation of the method under real-world conditions.

C. Computational Considerations and Benchmark.

A well-known drawback of MCMC-based E-steps is their high computational burden, particularly as the number of products and customers grows. To address this, we have optimized our implementation extensively: all summations are vectorized, and performance-critical components are accelerated via the `numba` library to run in compiled `C`. These improvements substantially reduce runtime, making the procedure feasible for the problem sizes of interest. In addition, we benchmark our approach against standard models—including the multinomial logit (MNL) and the rank-based model—following the comparisons in Topaloglu's work. This allows us to position our method in terms of both accuracy and computational trade-offs relative to established baselines.

References

[1] Blanchet J, Gallego G, Goyal V (2013) A Markov chain approximation to choice modeling. Technical report, Columbia University, NewYork.

[2] A. Serdar Şimşek, Huseyin Topaloglu (2018) Technical Note—An Expectation-Maximization Algorithm to Estimate the Parameters of the Markov Chain Choice Model. Operations Research 66(3):748-760.

Modelo Matemático para la toma de decisiones sostenibles en una cadena de suministro de madera sólida chilena bajo conflicto territorial

Jorge Félix Mena-Reyes
Dept. Ingenieria en Maderas
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
jorge.mena2101@alumnos.ubiobio.cl

Raúl Soto-Concha
Dept. Ciencias de la Ingeniería
Universidad de los Lagos
Puerto Montt, Chile
raul.soto@ulagos.cl

Francisco Vergara
Dept. Ingenieria en Maderas
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
fvergara@ubiobio.cl

Virna Ortiz-Araya
Dept. Gestión Empresarial
Universidad del Bío-Bío
Chillán, Chile
viortiz@ubiobio.cl

John Willmer Escobar
Dept. Accounting and Finance
Universidad del Valle
Cali, Colombia
john.willmer.escobar@correounivalle.edu.co

Rodrigo Linfati
Dept. Ingeniería Industrial
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
rlinfati@ubiobio.cl

Resumen— La cadena de suministro de madera sólida chilena enfrenta crecientes desafíos derivados de tensiones territoriales y conflictos sociales en la macrozona sur, lo que afecta directamente la continuidad de sus operaciones. Este trabajo propone un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) que integra de manera explícita criterios económicos, ambientales y sociales en la planificación táctica de la red logística forestal. La innovación metodológica radica en la incorporación de un índice de exposición territorial al conflicto, construido a partir de eventos históricos documentados y ponderados por expertos, que cuantifica el riesgo social asociado a cada conexión logística. El modelo considera como funciones objetivo la eficiencia en el uso de recursos, la minimización de distancias logísticas y la reducción de vulnerabilidad social. Se realizaron experimentos computacionales sobre una red forestal de la macrozona sur, evaluando fronteras de Pareto, configuraciones estratégicas y escenarios de oferta y demanda. Los resultados muestran que es posible reducir significativamente el riesgo social sin comprometer de forma relevante la eficiencia operativa, identificando soluciones de equilibrio que mejoran la resiliencia y legitimidad territorial de las cadenas forestales. Asimismo, se evidenció que la distribución espacial de la oferta tiene un impacto crítico en el desempeño de los objetivos, lo que resalta la necesidad de integrar variables territoriales en la planificación. La propuesta constituye un aporte práctico para diseñar cadenas de suministro más sostenibles y adaptadas a contextos de alta conflictividad sociopolítica en Chile.

Palabras clave*— aserradero, conflictos sociales, optimización, cadena de suministro, logística.*

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Multi-objective Optimization of Biomass Procurement with Supplier Diversification and Contractual Flexibility

Felipe T. Muñoz
Department of Industrial Engineering
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
fmunoz@ubiobio.cl

***Abstract*—This paper presents a multi-objective optimization model for biomass procurement planning that integrates cost efficiency, supplier diversification, and contractual flexibility. The proposed MILP formulation allows procurement managers to explore trade-offs between minimizing total procurement and storage costs and maximizing the number of selected biomass profiles. Contractual flexibility is introduced via a variation factor that permits deviations from contracted volumes. The ε-constraint method is used to generate Pareto-optimal solutions. Computational results highlight the marginal cost of diversification and demonstrate that flexibility and diversification act as compensatory mechanisms, enabling robust, cost-effective sourcing strategies.**

***Index Terms*—biomass procurement, multi-objective optimization, supplier diversification, contractual flexibility, MILP, Pareto frontier**

I. Introduction

Biomass is a key renewable energy source for industrial thermal applications due to its storability, dispatchability, and circularity. However, procurement planning is challenging due to fragmented supply, heterogeneous feedstocks, and logistical constraints. This paper focuses on a procurement model that explicitly incorporates diversification and flexibility as strategic levers for improving supply resilience and cost performance.

II. Problem Description

This study formulates a MILP model to support biomass procurement planning for thermal energy producers [1], [2]. The model selects biomass profiles—each defined by a type, moisture level, and supplier cluster—and determines the contracted and purchased volumes over a planning horizon.

Procurement decisions are subject to logistical, contractual, and operational constraints, including storage capacity, blending ratios, energy requirements, and minimum purchase commitments [3]. To enhance resilience, the model includes a secondary objective that maximizes the number of selected profiles, promoting supplier diversification [4].

The sets, parameters, and decision variables used in the MILP formulation are summarized in Table I. These elements define the structure of the biomass procurement model and support its operational, logistical, and contractual constraints.

TABLE I
Sets and Parameters

Symbol	Description
$\mathcal{R}$	Set of biomass types
$\mathcal{M}$	Set of moisture levels
$\mathcal{S}$	Set of supplier clusters
$\mathcal{P}$	Set of biomass profiles (each defined by a combination of biomass, moisture level, and supplier source)
$\mathcal{P}_{rm}$	Set of profiles associated with $r \in \mathcal{R}$ and $m \in \mathcal{M}$
T	Number of periods in planning horizon. $[T] = 1, 2, \ldots, T$.
c_p	Unit cost for profile p (μ/m^3)
h_t	Storage cost in period t
f_{rm}	Energy conversion factor (MWh/m^3)
e_t	Thermal energy demand in period t
d	Variation factor for flexibility $\in [0, 1]$
n_{rm}	Min. number of profiles for type r and moisture m
l_p	Min. volume if profile p is selected
u_p	Max. monthly volume from profile p
k_p	Pre-committed volume for profile p
$g_t^{\min}, g_t^{\max}$	Min/max total purchase volume in t
i_{rm}	Initial inventory for biomass type r and moisture m
b_t	Total storage capacity in period t
$a_r^{\min}, a_r^{\max}$	Inventory bounds for biomass type r
$q_{rt}^{\min}, q_{rt}^{\max}$	Mixing ratio bounds for type r in t
Variable	**Description**
$z_p \in \{0, 1\}$	1 if profile p is selected for procurement, and 0 otherwise
$o_p \geq 0$	Monthly contracted volume for profile p
$v_{pt} \geq 0$	Volume purchased from profile p in period t
$y_{rmt} \geq 0$	Volume consumed of r, m in period t
$w_{rmt} \geq 0$	Inventory of r, m at end of period t

A key feature is the inclusion of a monthly variation parameter $d \in [0, 1]$, which allows controlled deviations from contracted volumes, introducing flexibility without compromising contractual structure.

Inventory dynamics, energy conversion factors, and blending constraints ensure operational feasibility. The formulation enables integrated analysis of sourcing, storage, and consumption decisions while maintaining tractability through simplifying assumptions such as moisture conservation, constant biomass properties, and minimum purchase enforcement.

A real-world case from the Biobío region of Chile motivates the model development. The region hosts a dense network of sawmills and biomass suppliers, making procurement planning particularly complex. The model captures key challenges faced

by a thermal energy producer operating in this setting, including supplier diversification, contractual limits, and spatial logistics. Publicly available data from the Instituto Forestal de Chile (INFOR) [5] were used to inform biomass characteristics, supplier locations, and transportation assumptions.

III. Model

$$minimize \quad \sum_{p\in\mathcal{P}}\sum_{t\in[T]} c_p v_{pt} + \sum_{t\in[T]}\sum_{r\in\mathcal{R}}\sum_{m\in\mathcal{M}} h_t w_{rmt} \tag{1}$$

$$maximize \quad \sum_{p\in\mathcal{P}} z_p \tag{2}$$

$$l_p z_p \le o_p \le u_p z_p \qquad \forall p \in \mathcal{P} \tag{3}$$

$$o_p \ge k_p \qquad \forall p \in \mathcal{P} \tag{4}$$

$$(1-d)o_p \le v_{pt} \le (1+d)o_p \qquad \forall p \in \mathcal{P},\ t \in [T] \tag{5}$$

$$g_t^{\min} \le \sum_{p\in\mathcal{P}} v_{pt} \le g_t^{\max} \qquad \forall t \in [T] \tag{6}$$

$$w_{rm0} = i_{rm} \qquad \forall r \in \mathcal{R},\ m \in \mathcal{M} \tag{7}$$

$$w_{rm,t\text{-}1} + \sum_{p\in\mathcal{P}_{rm}} v_{pt} = y_{rmt} + w_{rmt} \qquad \forall r \in \mathcal{R},\ m \in \mathcal{M},\ t \in [T] \tag{8}$$

$$\sum_{r\in\mathcal{R}}\sum_{m\in\mathcal{M}} f_{rm} y_{rmt} \ge e_t \qquad \forall t \in [T] \tag{9}$$

$$\sum_{r\in\mathcal{R}}\sum_{m\in\mathcal{M}} w_{rmt} \le b_t \qquad \forall t \in [T] \tag{10}$$

$$a_r^{\min} \le \sum_{m\in\mathcal{M}} w_{rmt} \le a_r^{\max} \qquad \forall r \in \mathcal{R},\ t \in [T] \tag{11}$$

$$q_{rt}^{\min} \sum_{r'\in\mathcal{R}}\sum_{m\in\mathcal{M}} y_{r'mt} \le \sum_{m\in\mathcal{M}} y_{rmt} \le q_{rt}^{\max} \sum_{r'\in\mathcal{R}}\sum_{m\in\mathcal{M}} y_{r'mt} \quad \forall r \in \mathcal{R},\ t \in [T] \tag{12}$$

The objective function (1) minimizes the total cost over the planning horizon, including biomass procurement and inventory holding costs.

Equation (2) defines the diversification objective, initially used as a second objective in the bi-objective model. In the ε-constraint formulation, it is reformulated as a lower-bound constraint to control the minimum number of selected profiles.

Constraint (3) links the binary selection variable z_p to the contracted volume o_p. If a profile is selected, its volume must lie between the lower and upper bounds l_p and u_p; otherwise, it takes a value of zero.

Constraint (4) ensures that any pre-committed volume k_p is respected, requiring the contracted amount o_p to meet or exceed this obligation.

Constraint (5) defines the allowable deviation in actual deliveries v_{pt} around the contracted volume o_p, controlled by the flexibility parameter $d \in [0, 1]$. This introduces contractual tolerance for delivery adjustments.

Constraint (6) enforces that total procurement in each period remains within operational bounds defined by $g_t^{\min}$ and $g_t^{\max}$.

Constraint (7) sets the initial inventory w_{rm1} based on the available stock i_{rm} at the start of the horizon.

Constraint (8) maintains inventory continuity by stating that, in each period, inventory from the previous period plus deliveries equals consumption plus end-of-period inventory.

Constraint (9) guarantees that thermal energy demand e_t is met in every period by converting biomass consumption into energy using conversion factors f_{rm}.

Constraint (10) ensures that total inventory across all biomass types and moisture levels does not exceed the facility's storage capacity b_t.

Constraint (11) imposes inventory bounds per biomass type, restricting total stock within $a_r^{\min}$ and $a_r^{\max}$, to ensure quality and blending consistency.

Constraint (12) regulates biomass blending by bounding the proportion of each type r in the total consumed volume per period, enforcing combustion and process consistency.

IV. Model Implementation

The model was implemented in Julia using the JuMP modeling language [6], and solved with CPLEX v.22.1.2 via the CPLEX.jl interface. Computations were performed interactively using IJulia within the Jupyter environment. Typical instance solution times were under one second on a desktop with 8 GB RAM and an Intel i3-12100 processor. This level of performance supports practical use in interactive or sequential decision-making contexts, such as contract revisions or monthly procurement planning.

To generate Pareto frontiers for the bi-objective formulation, the ε-constraint method was applied. In this approach, the diversification objective (2) was reformulated as a constraint, and its right-hand side was incrementally increased to explore trade-offs. This allowed systematic variation of the minimum number of selected profiles, while minimizing procurement and inventory costs.

V. Computational Insights

Experiments show that increasing diversification leads to marginal cost increases, while expanding the spatial coverage of suppliers and reducing dependence on any single source. Pareto frontiers reveal that procurement costs can remain stable when diversification and contractual flexibility are balanced. In particular, the additional costs associated with supplier diversification can be offset by allowing greater contractual flexibility—highlighting a trade-off that decision-makers can exploit strategically.

Figure 1 presents the Pareto frontier obtained through the ε-constraint method for discrete values of the contractual flexibility parameter d. Each curve illustrates the trade-off between procurement cost and supplier diversification under a specific level of flexibility.

This practical equivalence between diversification and flexibility enables firms to meet procurement goals through different levers, depending on risk appetite, supplier relationships, or policy constraints. These insights support decision-makers in selecting cost-diversity configurations aligned with their operational and strategic goals.

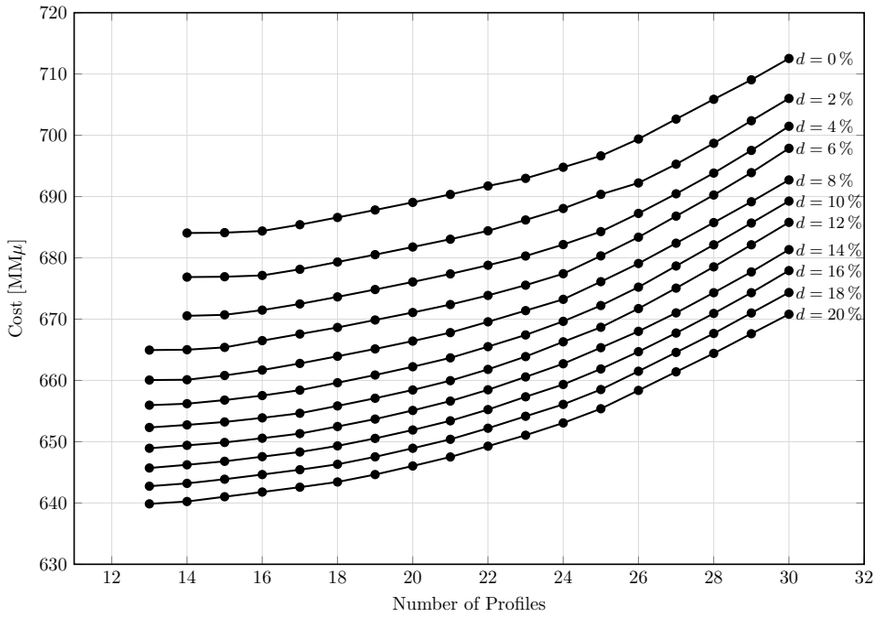


Fig. 1. Pareto frontiers illustrating the trade-off between procurement cost and supplier diversification under different values of contractual flexibility. Higher flexibility levels result in lower cost frontiers, while stricter contracts shift the frontier upward.

VI. Conclusion

The proposed model provides a structured approach for evaluating biomass procurement strategies under cost, diversification, and flexibility considerations. The ε-constraint method effectively reveals the trade-off surface, helping managers balance cost efficiency with resilience. The framework is adaptable to other resource planning settings and can be extended to include uncertainty or environmental indicators in future work.

Although this paper focuses on methodological development, the model structure is calibrated using realistic parameters drawn from a Chilean biomass procurement context.

References

[1] M. Cambero and T. Sowlati, "Sustainability assessment of forest bioenergy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 599–612, 2014.

[2] A. Zandiatashbar et al., "Optimizing biomass supply chains with mixed-integer models," *Biomass and Bioenergy*, vol. 119, pp. 165–178, 2018.

[3] M. Rahimi et al., "Simulation–optimization of biomass procurement under uncertainty," *Applied Energy*, vol. 306, 2022.

[4] A. Ahmadvand et al., "Multi-objective modeling in renewable energy supply," *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 1753–1768, 2021.

[5] Instituto Forestal de Chile (INFOR), "Inicio," [Online]. Available: https://www.infor.cl/. [Accessed: June 2025].

[6] I. Dunning, J. Huchette, and M. Lubin, "JuMP: A Modeling Language for Mathematical Optimization," *SIAM Review*, vol. 59, no. 2, pp. 295–320, 2017.

Un Modelo de Localización con Inventario con Selección de Políticas de Control de Inventario Capacitado y Multiproducto

1st Iván Martínez Godoy
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
ivan.martinez@alumnos.ucn.cl

2nd Juan Pablo Peralta-González
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
juan.peralta@ce.ucn.cl

3rd Mickael Inostroza Leon
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
mickael.inostroza@ce.ucn.cl

4th Francisco J. Tapia-Ubeda
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
francisco.tapia@ucn.cl

***Abstract*—Dentro de las decisiones relacionadas con la gestión de la cadena de suministros, las decisiones relacionadas al diseño de la red de la cadena de suministros tienden a hacerse relevantes dado el impacto en el largo plazo y los costos asociados. Esta investigación propone un modelo basado en la estructura de localización con inventarios integrando selección de políticas de control de inventario, restricciones de capacidad y múltiples productos. La selección de política de control de inventario se realiza para cada una de las bodegas instaladas, de manera independiente. Dada la complejidad del modelo propuesto, se presenta un enfoque de resolución basado en la Descomposición Generalizada de Benders.**

***Index Terms*—Localización con Inventarios, Selección de Políticas de Control de Inventarios, Descomposición Generalizada de Benders, Capacidades, Multiproducto**

I. Introducción y Revisión Bibliográfica

La gestión de la cadena de suministros es crucial para la competitividad de las organizaciones, especialmente en ambientes hipercompetitivos, ya que tiene un impacto significativo en la eficiencia operativa [1], [2]. Uno de los desafíos clave en esta gestión es el diseño de la red de cadena de suministros, que puede incluir selección de proveedores, localización de posibles centros de distribución y asignación de clientes, con el objetivo de satisfacer la demanda de los clientes de manera eficiente [3], [4].

Tradicionalmente la toma de decisiones para el diseño de la red de suministros se toma de manera aislada y jerárquicamente, sin considerar los problemas que puedan surgir bajo de la secuencia jerárquica. Una propuesta surge en base a la toma de decisiones de manera integral y cómo esta puede brindar ayuda a encontrar mejores soluciones globales.

Así, hace unas décadas nace los modelos de localización con inventario que tradicionalmente integran decisiones tácticas y estratégicas [5], [6], [7]. Sin embargo, estos modelos asumen a priori una política de control de inventario fija y conocida. En este contexto esta investigación propone un modelo novedoso de localización con inventarios, que permite la selección de la política de contro de inventarios que asegura costo-eficiencia. La selección de la política de control de inventarios se hace independientemente para cada una de las bodegas instaladas. El problema considera restricciones de capacidad para el inventario y el lote máximo de ordenamiento, siguiendo lo propuesto en [8], [9].

Dada la complejidad del modelo propuesto, se propone un enfoque de resolución basado en la Descomposición Generalizada de Benders la cual ha mostrado un gran desempeño en el contexto de modelos de localización con inventarios [10], [11], [12], [13].

II. Definición del Problema y Modelo Propuesto

El problema considera un conjunto conocido y fijo de proveedores y clientes finales. Se debe decidir qué bodegas se deben instalar y cuáles clientes atenderán. Adicionalmente, las bodegas instaladas deben asumir una política de control de inventarios por bodega independientemente, desde un conjunto de políticas potenciales. Además, se debe dimensionar el inventario que cada bodega localizada deberá mantener considerando la política seleccionada por la bodega.

El modelo matemático propuesto considera un conjunto conocido de clientes M, un conjunto de sitios potenciales para instalar bodegas N, un conjunto potencial de políticas de control de inventario P y un conjunto de productos K. La función objetivo (1) del modelo minimiza los costos esperados

totales del sistema, i.e., localización, asignación, e inventarios.

Conjuntos:

N	: Conjunto de bodegas candidatas
M	: Conjunto de clientes
K	: Conjunto de productos
P	: Conjunto de políticas de control de inventario

Parámetros:

FC_i	: Costo fijo de apertura de la bodega i
AC_{ij}	: Costo de asignación del cliente j a la bodega i
d_j^k	: Demanda del producto k en el cliente j
v_j^k	: Varianza de la demanda del producto k en el cliente j
$TCICP_p^k$	: Costo de inventario del producto k bajo la política p

Variables de Decisión:

X_{ip}	: Variable binaria que vale 1 si se instala la bodega i operando con la política p
Y_{ijp}	: Variable binaria que toma el valor de 1 si es que la bodega i atiende al cliente j con la política p
D_{ip}	: Media de la demanda percibida por la bodega i con la política p
V_{ip}	: Varianza de la demanda percibida por la bodega i con la política p

En base a esto, siguiendo lo propuesto en [14], el modelo genérico propuesto es como sigue:

Min

$$\sum_{i\in N}\sum_{p\in P} FC_i \cdot X_{ip} + \sum_{i\in N}\sum_{j\in M}\sum_{p\in P} AC_{ij}\cdot Y_{ijp} + \sum_{i\in N}\sum_{k\in K} X_{ip}\cdot TCICP_p^k(X,Y) \quad (1)$$

s.a:

$$\sum_{i\in N}\sum_{p\in P} Y_{ijp} = 1 \qquad \forall j \in M \quad (2)$$

$$Y_{ijp} \le X_{ip} \qquad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall p \in P \quad (3)$$

$$X_{ip} \le \sum_{j\in M} Y_{ijp} \qquad \forall i \in N, \forall p \in P \quad (4)$$

$$D_{ip}^k = \sum_{j\in M} Y_{ijp}\cdot d_j^k \qquad \forall i \in N, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (5)$$

$$V_{ip}^k = \sum_{j\in M} Y_{ijp}\cdot v_j^k \qquad \forall i \in N, \forall p \in P, \forall k \in K \quad (6)$$

$$G_p^k(X,Y) = 0 \qquad \forall p \in P, \forall k \in K \quad (7)$$

$$X_{ip} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in N, \forall p \in P \quad (8)$$

$$Y_{ijp} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall p \in P \quad (9)$$

El modelo minimiza los costos totales en (1), donde el primer término minimiza los costos fijos de localización, el segundo término representa los costos de asignación y el tercer término representa los costos asociados a las políticas de control de inventario para los productos según la política seleccionada. El conjunto de restricciones (2) obliga a que todos los clientes deben ser asignados. Las restricciones en (3) relaciona las variables binarias de asignación y localización. Las inecuaciones en (4) obliga que si las bodegas se abren deben tener al menos un cliente asignado. Las ecuaciones en (5) y (6) representan las restricciones del proceso de demanda respecto la media y la varianza que deben enfrentar las bodegas. Las restricciones en (7) representa restricciones propias de la política p que le dan factibilidad y de capacidad. Finalmente, las restricciones (8) y (9) son las restricciones de dominio de las variables.

III. Conclusiones y Trabajo Futuro

Las conclusiones del trabajo son preliminares, dado que se presenta una investigación en proceso. El modelo aborda un problema complejo y de gran relevancia, ya que integra decisiones de localización, asignación, políticas de control de inventario, capacidad y manejo multiproducto. Esta integración es fundamental, pues una deficiencia en alguna de estas decisiones puede condicionar el desempeño de toda la cadena de suministros. En la literatura, este tipo de problema no ha sido resuelto de manera integral, lo que refuerza la importancia y el impacto del modelo planteado.

La contribución principal consiste en proponer un modelo genérico que permite decidir, dentro de la formulación, qué política de inventario utilizar en cada bodega. Esto entrega una estructura más representativa de la realidad. Con ello, se aporta al ámbito académico al abrir nuevas líneas de investigación en modelos de optimización, y también al ámbito profesional al ofrecer un marco de apoyo a la toma de decisiones en el diseño de redes.

Como trabajo futuro, se contempla avanzar en el enfoque de resolución basado en la Descomposición Generalizada de Benders, así como considerar la diferenciación de políticas por clases de productos y la incorporación de decisiones multicriterio para la clasificación y priorización de recursos.

References

[1] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi, *Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies*. McGraw-Hill/Irwin, 2003.

[2] S. Chopra, *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. London: Pearson Education Limited, 2014.

[3] H. A. Eiselt and V. Marianov, "Applications of Location Analysis," *Applications of Location Analysis*, vol. 232, pp. 1–437, sep 2015.

[4] M. S. Daskin, *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley Sons, Inc., apr 1995.

[5] M. S. Daskin, C. R. Coullard, and Z. J. M. Shen, "An inventory-location model: Formulation, Solution Algorithm and Computational Results," *Annals of Operations Research*, vol. 110, no. 1-4, pp. 83–106, 2002.

[6] P. A. Miranda and R. A. Garrido, "Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 40, no. 3, pp. 183–207, 2004.

[7] R. Z. Farahani, H. Rashidi Bajgan, B. Fahimnia, and M. Kaviani, "Location-inventory problem in supply chains: A modelling review," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 12, pp. 3769–3788, 2015.

[8] P. A. Miranda and R. A. Garrido, "A Simultaneous Inventory Control and Facility Location Model with Stochastic Capacity Constraints," *Networks and Spatial Economics*, vol. 6, pp. 39–53, mar 2006.

[9] C. Araya-Sassi, P. A. Miranda, and G. Paredes-Belmar, "Lagrangian Relaxation for an Inventory Location Problem with Periodic Inventory Control and Stochastic Capacity Constraints," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, pp. 1–27, 2018.

[10] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda, and M. Macchi, "A Generalized Benders Decomposition based algorithm for an inventory location problem with stochastic inventory capacity constraints," *European Journal of Operational Research*, vol. 267, no. 3, pp. 806–817, 2018.

[11] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda, I. Roda, M. Macchi, and O. Durán, "Modelling and solving spare parts supply chain network design problems," *International Journal of Production Research*, vol. 58, pp. 5299–5319, sep 2020.

[12] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda-Gonzalez, and G. Gutiérrez-Jarpa, "Integrating supplier selection decisions into an inventory location problem for designing the supply chain network," *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 47, pp. 1–56, mar 2024.

[13] L. Olivares-Alvarez, P. A. Miranda-Gonzalez, F. J. Tapia-Ubeda, and S. Cannella, "The inventory location problem under periodic inventory control policy (R, S): modeling, solving and analysis," *Optimization and Engineering 2025*, pp. 1–73, mar 2025.

[14] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda, I. Roda, M. Marco, O. Durán, T. U. Francisco J., M. Pablo A., I. Roda, M. Marco, and D. Orlando, "An Inventory-Location Modeling Structure for Spare Parts Supply Chain Network Design Problems in Industrial End-User Sites," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 968–973, jan 2018.

Session N°2 – Track N°4

Network Design and Location

Chair: Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
Place: X-103
Time: 12:10 – 13:25

Intermodal Network Design: A Bikeway and Elevator Approach for Valparaiso, Chile

Time: 12:10 – 12:25
Authors:

- Torrealba-González, P. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

New Linear Optimization Model for the Stochastic Construction Site Layout Problem Under Risk of Facility Attacks

Time: 12:30 – 12:45
Authors:

- Morillo-Torres, D. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
- Prías-García, J. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
- Salcedo-Sepúlveda, L. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
- Gatica, G. *(Universidad Andres Bello)*

Diseño Logístico para la Planificación de Respuesta en Caso de Incendios: Un Caso de Estudio en Viña del Mar, Chile

Time: 12:50 – 13:05
Authors:

- Gaete-Sandoval, C. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Medina-Vergara, A. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Mitchell-González, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Verdejo-Varas, N. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Intermodal network design: A bikeway and elevator approach for Valparaiso, Chile

Pablo Torrealba-González*,Gabriel Gutiérrez-Jarpa*, Germán Paredes-Belmar*
*School of Industrial Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile
Emails: {pablo.torrealba, german.paredes, gabriel.gutierrez}@pucv.cl

***Abstract*—This work addresses the design of intermodal transport networks in urban areas with steep topography by integrating bikeways and vertical transport systems such as elevators. We propose a novel tri-objective optimization model that simultaneously minimizes infrastructure cost, maximizes covered demand, and maximizes the bikeway efficiency. To solve the problem, we develop a hybrid methodology combining an ε-constraint approach, a branch-and-cut framework, and a customized NSGA-II algorithm. The model is applied to a real-world case study in Valparaíso, Chile, demonstrating its capacity to generate diverse, cost-efficient, and accessible network designs.**

***Index Terms*—Intermodal transport, Network design, Bikeways, Urban elevators, Multi-objective optimization**

I. Introduction

Designing sustainable and inclusive urban transportation systems is a global challenge that often requires addressing specific social and geographical constraints. One case of such constraints is present in cities with abrupt topography, where elevation differences create strong barriers to mobility [1].

In general, bikeways have emerged as a sustainable mode of transport due to their affordability, environmental benefits, and positive impact on public health [2]. However, their effectiveness is often constrained in cities with steep gradients, where topographical challenges limit their usability. Historically, the development of bikeways has followed broader patterns of urban growth, rather than being the result of proactive planning.

In geographically heterogeneous cities such as Valparaíso, Chile. The organic evolution of bikeway infrastructure is typically insufficient to address the diverse mobility needs of the population. In such contexts, vertical transport systems such as elevators and funiculars, can serve as key connectors, integrating otherwise fragmented active transport networks. To ensure equitable access to bikeways across different urban sectors, city planners must deliberately allocate adequate space and resources [3], [4].

This work introduces a novel network design problem that incorporates both bikeways and elevators as complementary transport modes in urban areas with steep topography. The model aims to support decision-makers in planning cost-efficient infrastructure that maximizes accessibility while providing an efficient bikeway network. The main contributions of this work are the following:

- A tri-objective mathematical model that balances infrastructure cost, user coverage, and bikeway efficiency.
- An exact-based solution methodology combining the ε-constraint method, a branch-and-cut algorithm, and a multi-objective genetic algorithm.
- A real-world case study on the city of Valparaíso, Chile, offering practical insights into the trade-offs of multi-modal planning under budget constraints.

II. Problem Formulation

We define the Network Design Problem with Elevators and Bikeways (NDP-EB) as a tri-objective optimization model that determines the infrastructure to be implemented within the urban area. The decision-making process involves selecting a subset of elevator paths to construct specifying their lengths and connections and designing a bikeway network by identifying which segments should be built and where to install stations for parking or intermodal transfers.

The model is grounded in a bi-modal structure, where two types of infrastructure elements: bikeways and elevators, are jointly considered. Bikeways are represented as edges in a reference graph, while elevator connections must be associated to at least one terminal node that also belongs to the bikeway network. This ensures intermodal accessibility and enables seamless integration between modes.

An origin-destination (O/D) pair is considered covered if both nodes lie within a predefined radius of an active station, either bikeway or elevator. Based on this structure, the model simultaneously addresses three objectives: minimizing the total infrastructure cost (including bikeway segments, elevator connections, elevator stations and station installations), maximizing the total captured traffic across feasible O/D pairs, and minimizing the total weighted bikeway origin-destination distance traveled by users.

To ensure the network's operational feasibility, elevator paths must form coherent and functional connections with defined start and end points, and the entire infrastructure must be connected, avoiding the emergence of isolated substructures.

The model is formulated using binary and integer decision variables to determine station locations, edge activation (build bikeways or elevator), and O/D path assignments.

III. Solution Methodology

As previously discussed, the NDP-EB is a tri-objective optimization problem that involves inherent trade-offs among infrastructure cost (Z_c), captured traffic (Z_t), and bikeway origin-destination distance (Z_d). To address this complexity,

we adopt a hybrid solution strategy that combines a guided ε-constraint method with a metaheuristic exploration phase.

At the first tage of the solution approach a set of non-dominated solutions is generated through a sequential scalarization process. Specifically, we fix decreasing thresholds on the captured traffic objective Z_t, starting from its maximum attainable value down to zero. For each level of traffic, defined as ε_t, we solve an auxiliary mixed-integer model using CPLEX, minimizing infrastructure cost Z_c under the constraint $Z_t \geq \varepsilon_t$. To ensure network connectivity and feasibility, a branch-and-cut scheme is embedded in the solution process. Connectivity constraints are added dynamically via a separation routine based on depth-first search (DFS) and node pruning.

This first stage yields a series of flow-based solutions, which define *isoflow fronts*, each representing different trade-offs between cost and distance for a given level of captured traffic.

In the second stage, we apply a tailored NSGA-II algorithm. The metaheuristic explores alternative network configurations that satisfy the previously determined traffic coverage thresholds ε_t, while simultaneously minimizing infrastructure cost (Z_c) and the number of modal transfers (Z_m).

IV. Case Study: Urban Network of Valparaíso

To demonstrate the applicability of the NDP-EB model, we consider a real-world case study in Valparaíso, Chile. Valparaíso is a coastal city characterized by steep hills and abrupt elevation changes. The base transportation network was extracted from OpenStreetMap and preprocessed to filter and keep only major streets and pedestrian pathways suitable for bikeway infrastructure. Nodes eligible for elevator stations were selected based on elevation profiles and their proximity to cliffs or steep urban corridors. Bikeway candidates were identified over flat or moderately inclined street segments.

The resulting network includes a total of 236 nodes, from which 152 are considered as potential bikeway station locations (N_b), and 84 as candidates for elevator stations (N_e). In addition, 9 candidate elevators corridors are defined, each consisting of a set of nodes and segments that connect low-lying areas with high-elevation zones.

The demand set ψ comprises origin-destination pairs between densely populated residential areas and major urban attractors such as educational institutions, transport hubs, and service centers. Figure 1 represent the obtained graph.

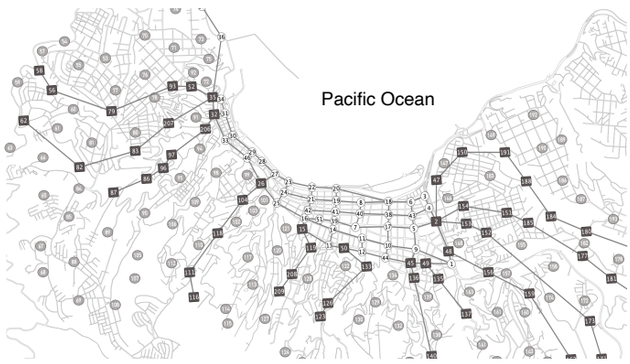


Fig. 1. Urban network of Valparaíso and considered graph representation

V. Results and Conclusions

We introduced the NDP-EB, a novel tri-objective optimization model that simultaneously designs bikeways and vertical transportation infrastructure to enhance multimodal accessibility in urban areas with challenging topography.

Several compact MILP formulations were tested using a comercial solver. However, due to the high combinatorial complexity of large-scale instances—such as the case of Valparaíso—exact methods showed limited scalability and were unable to provide solutions within acceptable computational times.

To overcome these limitations, we developed a tailored genetic algorithm that effectively explores the solution space. The algorithm encodes decisions related to station locations and infrastructure activation, evaluates all three objectives, and applies dominance-based selection to guide the search.

The proposed approach enables the generation of a diverse set of relevant solutions that reflect relevant trade-offs between cost, accessibility, and transfer efficiency.

References

[1] D. A. Escobar G, W. Sarache, and E. Jiménez-Riaño, "The impact of a new aerial cable-car project on accessibility and co2 emissions considering socioeconomic stratum. a case study in colombia," *Journal of Cleaner Production*, vol. 340, p. 130802, 2022.

[2] H. Gonzalo-Orden, A. Linares, L. Velasco, J. M. Díez, and M. Rojo, "Bikeways and cycling urban mobility," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 160, pp. 567 – 576, 2014, xI Congreso de Ingenieria del Transporte (CIT 2014).

[3] A. Mauttone, G. Mercadante, M. Rabaza, and F. Toledo, "Bicycle network design: model and solution algorithm," *Transportation Research Procedia*, vol. 27, pp. 969 – 976, 2017, 20th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2017, 4-6 September 2017, Budapest, Hungary.

[4] A. Giovannini, F. Malucelli, and M. Nonato, "Cycle-tourist network design," *Transportation Research Procedia*, vol. 22, pp. 154 – 163, 2017, 19th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT2016, 5-7 September 2016, Istanbul, Turkey.

New Linear Optimization Model for the Stochastic Construction Site Layout Problem Under Risk of Facility Attacks

1st Daniel Morillo-Torres
Department of Civil and Industrial Engineering
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Cali, Colombia
daniel.morillo@javerianacali.edu.co

2nd Johana Prías García
Department of Civil and Industrial Engineering
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Cali, Colombia
johanaprias@javerianacali.edu.co

3rd Laura Salcedo Sepúlveda
Department of Civil and Industrial Engineering
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Cali, Colombia
laurasalcedo@javerianacali.edu.co

4th Gustavo Gatica
Faculty of Engineering
Universidad Andres Bello
Santiago, Chile
ggatica@unab.cl

***Abstract*—This paper addresses the Construction Site Layout Planning Problem (CSLP) under uncertainty by incorporating stochastic attacks and protection strategies into a unified optimization framework. Unlike traditional deterministic or adversarial bi-level models, this work treats disruptions—such as theft, vandalism, and accidental damage—as exogenous stochastic events, more accurately reflecting real-world construction environments. We propose a novel, fully linear Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model that integrates three key decision layers: facility placement, temporal relocation, and protection deployment. To handle the uncertainty inherent in attack scenarios, the model employs a Sample Average Approximation (SAA) method, enabling statistically robust solutions through scenario sampling. Our formulation supports dynamic, multi-period layouts while ensuring computational tractability. Results suggest that the proposed approach can serve as an effective decision-support tool for enhancing resilience and minimizing expected costs in vulnerable construction site settings.**

***Index Terms*—Construction site layout, mixed-integer linear programming, sample average approximation, stochastic optimization, insert**

I. Introduction

The Construction Site Layout Planning Problem (CSLP) addresses the challenge of determining optimal placements of temporary facilities on construction sites, considering the evolving nature and constraints of construction projects [1]. These temporary facilities may include offices, warehouses, workshops, and storage units, all of which must be arranged to support the project's execution efficiently and safely. Improper layout decisions can significantly hinder operations, increasing transportation times, safety risks, and overall project costs.

The CSLP is closely related to the Quadratic Assignment Problem (QAP), a well-known NP-Hard problem in which n facilities are assigned to m locations with the objective of minimizing the total interaction cost, defined by distance-weighted flow between facilities [2]. In a construction context, this flow might represent the frequency of material transfers or personnel movement between installations. Unlike the classical Facility Location Problem (FLP), QAP involves two layers of decision-making: selecting facility types and assigning them to specific locations, both of which significantly impact logistical efficiency. The NP-Hard nature of these problems implies that finding an optimal solution becomes computationally infeasible as the scale of the project increases [3, 4].

The CSLP can be classified based on different approaches [5]. For example, it can be static, where facilities are assigned once and remain fixed throughout the construction period; or dynamic, for more complex projects, where facilities can be relocated during different stages of the project for more efficient use of space and resources. On the other hand, the CSLP can be discrete or continuous. In the former, facilities are placed in predetermined locations (discrete points), while continuous models allow placements at any point (continuous coordinates) within the construction site area. The literature also includes a classification based on the graphical representation of temporary facilities, with notable examples including rectangles, grids, points, and free-form shapes. The latter better reflects the real characteristics of systems; however, it typically entails increased modeling complexity.

The literature has mainly focused on deterministic models (single- or multi-objective), primarily aiming at cost minimization or the maximization of operational efficiency [6], while omitting uncertainty components that can negatively impact the project due to the lack of predictability. Among these uncertainties are so-called attacks on construction site facilities, understood as potential acts of terrorism, vandalism, theft, or deliberate damage that arise from the lack of security measures, thereby increasing the project's vulnerability

[7, 8]. These locations are considered easy targets—such as for thieves—because the high value of exposed plants and equipment offers quick gains. These hazardous events not only have monetary consequences but also delay the construction schedule [9]. Planning that accounts for unexpected security-related events can reduce the probability of attacks on all facilities by up to 30% [10].

However, protecting the most vulnerable facilities or predictable targets is not necessarily the most cost-effective way to address threats [11]; the strategies and methods used to protect these spaces and to produce better and more resilient protection plans must consider the interdependence between system components and the risk that multiple components or facilities may be attacked or damaged simultaneously, which can amplify the overall system impact. The literature shows that construction site layout affects many spatial aspects of the security system and significantly impacts the effectiveness of implemented countermeasures [7]. For this reason, several research questions arise for construction project managers: (1) Is it worth applying new security countermeasures when relocating a facility? (2) Should a facility be protected by different countermeasures at different times? (3) How does cost minimization change when accounting for these random attack components? among others. However, few studies have investigated the implementation of security measures during the construction phase. This study focuses on these issues.

II. Problem Description

CSLP under uncertainty has gained attention due to its applicability in modern construction, where external disruptions are common. Traditionally, robustness in layout planning has been approached through bi-level optimization, where potential disruptions—modeled as adversarial attacks—are assumed to be strategic decisions made by an intelligent attacker. In these models, the attacker operates in the upper level, seeking to maximize system disruption, while the planner responds in the lower level by minimizing the resulting cost or damage [10]. Although these models offer insightful solutions under worst-case scenarios, they rely on the assumption of rational and strategic adversaries, which may not hold in real-world contexts.

In practice, many threats to construction sites—such as theft, vandalism, accidental fires, or structural failures are inherently stochastic and emerge without deliberate planning. These events are influenced by environmental, social, or operational factors rather than an adversary's strategic calculation. Therefore, it is more realistic to treat such disruptions as random events characterized by probabilistic distributions. This shift from deterministic or bi-level perspectives to stochastic modeling offers a more grounded representation of real-world risk.

Despite this, existing literature on stochastic CSLP remains limited. Most robust formulations introduce non-linearities or are computationally intensive, which restricts their scalability. Furthermore, they often neglect the integration of countermeasures—such as surveillance systems, reinforcement measures, or relocation policies—into the decision-making process. The challenge lies in designing a tractable optimization model that can simultaneously handle dynamic layouts, random attacks, and cost-effective protection strategies.

III. Proposed Model and Contributions

This paper proposes a new approach to the CSLP that incorporates stochastic attacks and countermeasure planning into a unified, fully linear Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model. The formulation is designed to address three decision levels: (1) the selection of facilities, (2) the assignment of these to different locations in each period, considering opening, operation, and closing costs, and (3) what protective measures to implement at each location and time. The objective is to minimize the total expected cost, which comprises facility deployment and relocation costs, protection costs, and the expected damage from potential attacks. The aim is to develop a model grounded in realistic assumptions about uncertainty in construction environments.

The attack component on the facilities involves a doubly stochastic system: the occurrence of a potential attack on a facility in a specific period, the threat level of the attack, and the economic value of the potential damage. To address this, the stochastic optimization model is simplified using the *Sample Average Approximation* (SAA) approach. This method consists of taking M independent samples of size n, solving each one to obtain a candidate solution $\hat{X}$ for each sample, and then evaluating each $\hat{X}$ on a new independent sample N', ultimately selecting the one with the best objective function value.

The principal contributions of this research can be summarized as follows:

- **Stochastic Attack Modeling:** Departing from bi-level adversarial formulations, we model attacks as exogenous stochastic events. This perspective better reflects real-world uncertainties that are not driven by intelligent opponents but occur due to chance.
- **Fully Linear MILP Formulation:** Unlike prior robust models that introduce non-linearity, our model maintains full linearity, improving computational efficiency and ensuring solvability using standard optimization software.
- **SAA approach:** To tackle the stochastic components, we implement the SAA method, which approximates the expected objective by sampling multiple attack scenarios. This approach enables consistent and statistically grounded optimization under uncertainty.

The proposed model incorporates multiple periods, dynamic facility reassignments, and budget-constrained protection strategies. It extends the scope of traditional CSLP formulations by introducing a holistic, risk-aware planning framework. As a result, it is expected that this model will provide a practical decision-support tool for minimizing risks and costs in volatile construction environments, paving the way for safer and more resilient site layouts.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Research Seedbed SEIN3 at Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia.

REFERENCES

[1] A. A. Hawarneh, S. Bendak, and F. Ghanim, "Construction site layout planning problem: Past, present and future," *Expert Systems with Applications*, vol. 168, p. 114247, 2021.

[2] A. Silva, L. C. Coelho, and M. Darvish, "Quadratic assignment problem variants: A survey and an effective parallel memetic iterated tabu search," *European Journal of Operational Research*, vol. 292, no. 3, pp. 1066–1084, 2021.

[3] S. Sahni and T. Gonzalez, "P-complete approximation problems," *J. ACM*, vol. 23, no. 3, p. 555–565, jul 1976.

[4] X. Song, F. Peña-Mora, C. Shen, Z. Zhang, and J. Xu, "Modelling the effect of multi-stakeholder interactions on construction site layout planning using agent-based decentralized optimization," *Automation in Construction*, vol. 107, 2019.

[5] M. Xu, Z. Mei, S. Luo, and Y. Tan, "Optimization algorithms for construction site layout planning: a systematic literature review," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. ahead-of-print, 8 2020.

[6] H. Yin, "Multi-objective optimization analysis of construction management site layout based on improved genetic algorithm," *Systems and Soft Computing*, vol. 6, p. 200113, 2024.

[7] H. Said and K. El-Rayes, "Optimizing the planning of construction site security for critical infrastructure projects," *Automation in Construction*, vol. 19, pp. 221–234, 2010.

[8] N. Jones, "Airport security in the spotlight," *Nature*, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1038/news060807-18

[9] R. Berg and J. Hinze, "Theft and vandalism on construction sites," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 131, pp. 826–833, 2005.

[10] Z. Li, W. Shen, J. Xu, and B. Lev, "Bilevel and multi-objective dynamic construction site layout and security planning," *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 1–16, 2015.

[11] R. L. Church, M. P. Scaparra, and R. S. Middleton, "Identifying critical infrastructure: The median and covering facility interdiction problems," *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 94, pp. 491–502, 2004.

Diseño logístico para la planificación de respuesta en caso de incendios: un caso de estudio en Viña del Mar, Chile

Camila Gaete Sandoval
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
camila.gaete.s@mail.pucv.cl

Antonia Medina Vergara
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
antonia.medina.v@mail.pucv.cl

Fernanda Mitchell González
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
fernanda.mitchell.g@mail.pucv.cl

Natalia Verdejo Varas
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
natalia.verdejo.v@mail.pucv.cl

Germán Paredes-Belmar
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
german.paredes@pucv.cl

Gabriel Gutiérrez-Jarpa
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl

***Abstract*—The wildfire that occurred in Viña del Mar during the summer of 2024 exposed the lack of an efficient relief network, leaving a highly vulnerable population unprotected. In this context, a mixed-integer optimization model is developed to design a logistical network for El Olivar, one of the affected areas. The network includes shelters and supply centers, subject to constraints on capacity, geographical coverage, supply flow, and budget. The objective is to maximize the number of people covered by shelters within a defined radius, while ensuring the exact delivery of essential resources. The results show feasible and efficient solutions, strategically assigning facilities and resources to serve more than 4.000 people. A sensitivity analysis on the budget is also conducted, revealing saturation thresholds in coverage. The model is scalable and adaptable to various disaster scenarios, offering a valuable tool for emergency response network planning.**

Keywords—emergency shelter planning, mixed-integer optimization, network design, wildfire

I. Introducción

En el sector de El Olivar, ubicado en la comuna de Viña del Mar, los incendios forestales representan una amenaza recurrente debido a la falta de planificación territorial adecuada y a las condiciones urbanas altamente vulnerables. Esta situación se evidenció de manera crítica durante el incendio forestal ocurrido en el verano de 2024, el cual expuso graves deficiencias en la respuesta ante emergencias, especialmente en la disponibilidad y accesibilidad de albergues para los damnificados. El Olivar carece de zonas de transición y amortiguación entre la vegetación y las edificaciones [1], lo que significa que casi 7.000 viviendas, en su mayoría construidas con materiales inflamables, colindan directamente con áreas boscosas. A esto se suma la falta de recursos de respuesta, lo que resultó en una atención ineficaz de la población afectada y una exposición adicional al riesgo.

El principal desafío identificado es la ausencia de una red de albergues para enfrentar catástrofes de gran magnitud. La Fig. 1, ilustra el diseño de la red considerando tres niveles: *centros de acopio*, responsables de suministrar insumos a los *albergues*, y estos últimos, encargados de atender directamente a las *zonas afectadas* (población). En total, se contemplan múltiples ubicaciones potenciales para cada tipo de instalación, y las conexiones entre niveles representan las posibles asignaciones logísticas que se evaluarán en el modelo. Esta estructura optimizará la cobertura poblacional y el flujo de recursos bajo restricciones de capacidad y presupuesto.

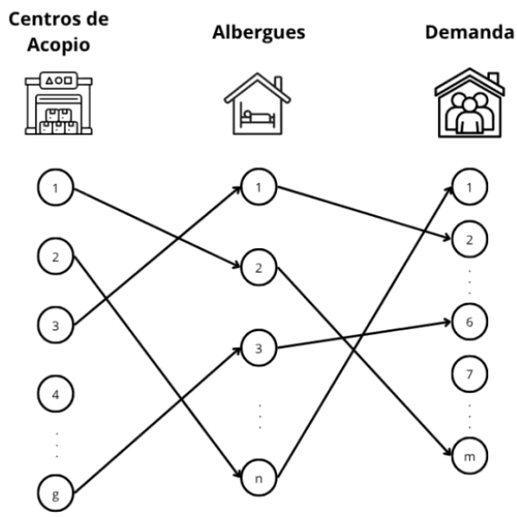


Fig. 1. Diseño inicial de red logística en el territorio afectado

La urgencia de resolver este problema se hace aún más evidente al considerar que el incendio de febrero de 2024 ha sido la segunda catástrofe con mayor número de víctimas humanas en la historia reciente de Chile [2]. Además, las proyecciones del cambio climático [3] y el patrón de crecimiento urbano [4] hacen prever que emergencias similares seguirán ocurriendo. En este contexto, el sector de El Olivar, sector de la Ciudad de Viña del Mar en Chile, presenta características especialmente críticas: concentración de población de escasos recursos y una alta proporción de

Esta investigación está financiada parcialmente por el proyecto FONDECYT 1250602

adultos mayores, lo que refuerza la necesidad de implementar una red de atención que priorice estos grupos vulnerables.

El ciclo de gestión del riesgo, como se presenta en marcos como el *Sendai Framework* [5] y en la literatura especializada sobre emergencias [6], contempla cuatro fases clave: mitigación, preparación, respuesta y recuperación. En particular, la fase de preparación abarca la planificación anticipada, la disposición de recursos y el fortalecimiento de capacidades institucionales y comunitarias para responder eficazmente cuando ocurra el desastre. Nuestra propuesta se enmarca en esa etapa, al diseñar redes de albergues y centros de acopio que consideren diferentes escenarios de demanda, avanzando hacia una preparación más robusta frente al riesgo de incendios forestales.

Frente a este escenario, se propone diseñar una red logística de albergues y centros de acopio que permita maximizar la cobertura de la población afectada y mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante eventos catastróficos futuros. Esta red debe considerar factores como la accesibilidad desde los puntos de mayor riesgo, la capacidad de atención y almacenamiento de cada instalación, y la eficiencia en el uso de recursos presupuestarios limitados. El desarrollo de una solución óptima para este problema permitirá que, al momento de una catástrofe, todas las personas afectadas puedan llegar a un albergue de manera rápida y segura, recibiendo además los suministros necesarios para su bienestar inmediato.

II. Revisión Literaria

La revisión de la literatura en investigación de operaciones muestra un desarrollo significativo en modelos para la gestión de catástrofes, con enfoques en la optimización de recursos y reducción de tiempos de respuesta. Se han estudiado ampliamente problemas de gestión de escombros [7] [8], distribución de ayuda humanitaria mediante modelos de localización-asignación [9] evacuaciones [10] procesos inmediatos de rescate post-desastre [11] así como la necesidad de mejorar la eficiencia económica de la logística humanitaria, considerando que esta representa cerca del 73% de los costos totales de socorro [12]. Sin embargo, no se han encontrado estudios orientados específicamente a incendios forestales ni al contexto chileno, lo que constituye una brecha importante. En contraste, nuestro trabajo aporta desde la práctica, al aplicar estos enfoques metodológicos al diseño de redes de apoyo para emergencias, con énfasis en su aplicabilidad real.

III. Metodología

El desarrollo del presente trabajo siguió una metodología estructurada en cuatro etapas principales:

A. Diagnóstico del problema y levantamiento de información

Se realizó una revisión de antecedentes del sector El Olivar en Viña del Mar, con énfasis en eventos catastróficos recientes, particularmente el incendio forestal de febrero de 2024. Este análisis permitió identificar la carencia de una red de albergues adecuada como un problema crítico y de alto interés público. Asimismo, se recopiló información territorial, demográfica y logística para definir parámetros relevantes del modelo.

B. Formulación del modelo de optimización

Se diseñó un modelo de programación lineal entera mixta orientado a maximizar la cobertura de la población afectada. El modelo considera restricciones de capacidad, cobertura geográfica, flujo de suministros y presupuesto disponible, además de variables binarias para la apertura de albergues, centros de acopio y asignaciones entre nodos.

Para la evaluación del desempeño de las soluciones propuestas, se definieron dos indicadores principales: los costos asociados a la red y el tiempo computacional requerido para la generación de la red teórica en el modelo. El primero se mide a través de la estimación de los recursos económicos que la formulación del problema asigna a la operación de la red. El segundo corresponde al tiempo de procesamiento que demanda el modelo para entregar una solución factible bajo las condiciones planteadas, lo que permite evaluar su eficiencia en términos de cómputo.

C. Generación de instancia

Dado que no existen datos oficiales desagregados del sector El Olivar, se generó una instancia representativa mediante estimaciones razonadas basadas en superficie, densidad habitacional y composición por hogar. Se definieron 10 nodos de demanda, 6 posibles ubicaciones de albergues y 8 centros de acopio, con parámetros diferenciados de costos y capacidades.

La identificación de albergues potenciales se realizó mediante la inspección de imágenes satelitales, considerando infraestructuras comunitarias tales como iglesias, colegios, centros deportivos y sedes vecinales. Estos recintos, siempre que no resulten dañados por el fuego, constituyen espacios factibles para habilitar como refugios temporales dada su vocación de servicio público y capacidad de albergar personas. En el caso de los centros de acopio, se seleccionaron zonas abiertas y despejadas que permitan la instalación rápida de carpas u otras estructuras modulares destinadas al almacenamiento y distribución de suministros. La cantidad total de instalaciones modeladas se definió en función de la disponibilidad de estos espacios dentro del polígono delimitado por el equipo en el sector El Olivar, garantizando así la coherencia territorial y operativa de la propuesta.

D. Análisis de sensibilidad

Finalmente, se evaluó el comportamiento del modelo ante distintas condiciones presupuestarias. Se analizaron escenarios con aumentos y reducciones del presupuesto, identificando su impacto directo sobre la cobertura alcanzada y determinando umbrales de saturación en la función objetivo.

IV. Resultados Del Caso de Estudio

La implementación del modelo en una instancia representativa del sector El Olivar, considerando 10 zonas afectadas, 6 ubicaciones posibles para albergues y 8 centros de acopio, bajo un presupuesto de 3.300.000.000 CLP, arrojó resultados consistentes con los objetivos de cobertura máxima. Se identificó que los albergues de ubicación central fueron preferidos por el modelo, ya que permitieron cubrir

simultáneamente múltiples nodos de demanda, optimizando el uso del presupuesto disponible. Asimismo, los centros de acopio con mayor capacidad fueron utilizados de forma eficiente, pero sin exceder la demanda real asignada a cada albergue, lo que evitó el sobreabastecimiento. En total, se logró cubrir a 4.290 personas con asignaciones eficientes de recursos y respetando todas las restricciones de capacidad, cobertura y presupuesto.

Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento del modelo bajo los dos indicadores definidos. En el caso del presupuesto más bajo (2.500.000.000 CLP), el modelo alcanzó un tiempo de resolución de 0,219622 segundos, evidenciando una alta eficiencia computacional. Es importante precisar que, aunque se defina un presupuesto máximo, el modelo no gasta recursos de manera innecesaria: una vez cubierta la población alcanzable con las instalaciones disponibles, no se abren albergues ni centros de acopio adicionales que no aporten valor, por lo que los costos reflejan un uso racional del presupuesto. Además, el análisis de sensibilidad mostró que el modelo responde con alta sensibilidad ante reducciones presupuestarias (una caída del 24,24 % en el presupuesto reduce la cobertura en un 23,08 %), mientras que presenta un punto de saturación a partir del presupuesto base, en el cual aumentos adicionales no generan mejoras en la cobertura. De este modo, las métricas de costo y tiempo complementan el objetivo de cobertura máxima, aportando una visión más completa sobre la eficiencia, factibilidad y robustez de las soluciones generadas.

Discusión y Conclusiones

El modelo desarrollado permitió diseñar una red integral de atención ante catástrofes en el sector El Olivar, maximizando la cobertura de la población damnificada bajo restricciones presupuestarias, logísticas y geográficas. La implementación demostró que el modelo entrega asignaciones factibles y cercanas al óptimo, coordinando capacidad y demanda de manera eficiente y evitando tanto el sobrestock como el subabastecimiento de insumos.

El trabajo tiene potencial de escalabilidad. Se considera un esquema directo entre centros de acopio y albergues, pudiendo extenderse fácilmente a una red de cuatro niveles: proveedores, centros de acopio mayores, centros de acopio secundarios y albergues. Este diseño multinivel fortalecería la gestión logística en escenarios de mayor envergadura o complejidad territorial.

Además, el suministro no se limita a un único ítem, sino a combinaciones específicas de bienes por persona (alimentos, kits de higiene, abrigo), lo que exige una planificación detallada y realista. Asimismo, la arquitectura y lógica del modelo son plenamente replicables en otros tipos de emergencias (terremotos, tsunamis, inundaciones), ofreciendo una herramienta versátil para la planificación estratégica de redes de respuesta adaptables a distintas escalas y contextos.

Referencias

[1] Gobierno Regional de Valparaíso. (2024). PLAN REGIONAL DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL REGIÓN DE VALPARAÍSO. pp. 82-87. https://eae.mma.gob.cl/storage/documents/04_Anteproyecto_PROT_Valparaiso_Continental_1.pdf.pdf

[2] Cigiden. (2024, 27 febrero). Informe de Daños: Evento Incendios 02 y 03 de febrero de 2024, Viña del Mar (Región de Valparaíso) CIGIDEN. CIGIDEN. https://www.cigiden.cl/informe-de-danos-evento-incendios-02-y-03-de-febrero-de-2024-vina-del-mar-region-de-valparaiso/

[3] Gobierno de Chile. (2021). Estrategia climática de largo plazo de Chile. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf

[4] Torres, E. Z. (2023, 22 marzo). Nuevos campamentos en Valparaíso: las consecuencias invisibles de la pandemia. *El* Mostrador. https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2021/04/05/nuevos-campamentos-en-valparaiso-las-consecuencias-invisibles-de-la-pandemia/

[5] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (2015) Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. Geneva: United Nations. https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030

[6] Arifah, A.R., Mohd Tariq, M.N. & Muhamad Hanafiah, J. (2019) 'Decision making in disaster management cycle of natural disasters: A review', International Journal of Public Health and Clinical Sciences, 6(3), pp. 1–21. doi: 10.32827/ijphcs.6.3.1

[7] Nickdoost, N., Jalloul, H. & Choi, J. (2022) 'An integrated framework for temporary disaster debris management sites selection and debris collection logistics planning using geographic information systems and agent-based modeling', International Journal of Disaster Risk Reduction, 80, 103215. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103215

[8] Lorca, Á., Çelik, M., Ergun, Ö. & Keskinocak, P. (2017) 'An optimization-based decision-support tool for post-disaster debris operations', Production and Operations Management, 26(6), pp. 1076–1091. https://doi.org/10.1111/poms.12643

[9] Shavarani, S.M., Nejad, M.G., Rismanchian, F. & Izbirak, G. (2019) 'Multi-level facility location-allocation problem for post-disaster humanitarian relief distribution: A case study', Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 110, pp. 70–84. https://doi.org/10.1108/JHLSCM-05-2018-0036

[10] Moua, E., Chen, X., Liu, Y. & Xu, X. (2020) 'A framework proposal to integrate humanitarian logistics practices, disaster management and disaster mutual assistance: A Brazilian case', Safety Science. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104965

[11] D'Uffizi, A., Simonetti, M., Stecca, G. & Confessore, G. (2015) 'A simulation study of logistics for disaster relief operations', Procedia CIRP, 33, pp. 157–162. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.029

[12] Kundu, T., Sheu, J-B. & Kuo, H-T. (2022) 'Emergency logistics management—Review and propositions for future research', Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 164, 102789. https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102789

Session N°3 – Track N°1

Analytics and Artificial Intelligence

Chair: Maldonado, S. *(Universidad de Chile)*
Place: G6-054
Time: 15:40 – 16:55

Predicción de Robos Mediante Aprendizaje Profundo en Base a Datos de una Aplicación de Reportes Ciudadanos

Time: 15:40 – 15:55
Authors:

- Maldonado, S. *(Universidad de Chile)*
- Vairetti, C. *(Universidad de Los Andes)*
- Weber, R. *(Universidad de Chile)*
- Roa, J. *(Universidad de Chile)*
- Jara, R. *(Universidad de Los Andes)*
- Queirolo, J. *(Universidad de Los Andes)*

Modelación Prescriptiva Aplicada a Cobranza de Deudas Utilizando Aprendizaje de Máquinas y Medidas de Rentabilidad

Time: 16:00 – 16:15
Authors:

- Sánchez, C. *(Universidad de Los Andes)*
- Vairetti, C. *(Universidad de Los Andes)*
- Maldonado, S. *(Universidad de Chile)*

¿Qué hace a un Buen Vendedor? Aprendizaje Profundo Aplicado a Upselling en el Contexto de una Organización Social

Time: 16:20 – 16:35
Authors:

- Aliaga, S. *(Universidad de Los Andes)*
- Vairetti, C. *(Universidad de Los Andes)*
- Macera, R. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Maldonado, S. *(Universidad de Chile)*

Modelo Basado en Inteligencia Artificial para Predecir el Éxito del Proceso de Baja de Sedación de Pacientes en Ventilación Mecánica

Time: 16:40 – 16:55
Authors:

- Zumaeta, C. *(Universidad de Los Andes)*
- Vairetti, C. *(Universidad de Los Andes)*
- Maldonado, S. *(Universidad de Chile)*

Predicción de robos mediante aprendizaje profundo en base a datos de una aplicación de reportes ciudadanos

Sebastián Maldonado, Carla Vairetti, Richard Weber, Juaquín Roa, Ricardo Jara, José Tomás Queirolo

***Abstract*—Resumen Extendido**

***Index Terms*—Analítica, Predicción de Crimen, Aprendizaje de Máquinas, Redes profundas basadas en grafos.**

PREDICTIVE policing representa una línea de investigación relevante que utiliza análisis de datos para anticipar posibles actividades delictivas.

En los últimos años, la prevención del delito y la seguridad pública se han convertido en preocupaciones apremiantes en muchos países, ya que los ciudadanos perciben cada vez más un aumento de la actividad delictiva. Encuestas en múltiples regiones muestran que el miedo al crimen a menudo supera ahora las preocupaciones por la desigualdad social, las dificultades económicas y la inestabilidad política, moldeando cómo las personas experimentan su vida diaria e interactúan con sus comunidades. Esta percepción acentuada de inseguridad ha llevado a individuos y hogares a adoptar diversas medidas para protegerse, que van desde mejoras en la seguridad física hasta cambios en el comportamiento rutinario. Comprender y abordar estas percepciones es fundamental, ya que no solo reflejan las tendencias delictivas reales, sino que también influyen en la confianza pública en las instituciones y la cohesión social.

En respuesta a esta creciente preocupación, las aplicaciones móviles diseñadas para reportar delitos y actividades sospechosas han surgido como herramientas importantes para cerrar la brecha entre los ciudadanos y las fuerzas del orden. Aplicaciones como SOSAFE y plataformas similares en todo el mundo permiten a los usuarios reportar incidentes rápidamente, lo que permite a las autoridades analizar la información entrante, priorizar casos y responder de manera más efectiva. Estas herramientas no solo mejoran la capacidad de respuesta de los sistemas de seguridad pública, sino que también fomentan un sentido de participación comunitaria y responsabilidad compartida en la prevención del delito. Sin embargo, el uso generalizado de estas plataformas también introduce desafíos, como la gestión del gran volumen de informes generados por los usuarios y la resolución del problema de la clasificación errónea o el etiquetado impreciso de eventos, lo que puede afectar la eficiencia de los esfuerzos de respuesta.

El aprendizaje profundo (DL) ha ganado una atención creciente en la última década, convirtiéndose en la solución preferida para diversas tareas de aprendizaje automático, incluyendo la visión por computadora, el procesamiento de señales y el análisis de texto [1]. En particular, los mecanismos de atención basados en transformadores han mejorado significativamente el rendimiento de los modelos de DL en tareas de lenguaje natural, abriendo nuevas posibilidades para la investigación en análisis de texto y creando oportunidades para mejorar la toma de decisiones [1], [2].

Un área que se ha beneficiado del DL es el análisis de delitos, donde el objetivo es modelar patrones y tendencias delictivas a partir de datos [3], [4]. Las técnicas de aprendizaje automático y DL pueden utilizarse como una herramienta descriptiva/diagnóstica para comprender el comportamiento criminal, como una herramienta predictiva para determinar el riesgo de actividad criminal en áreas específicas para medidas preventivas, o como una herramienta de automatización para clasificar texto en categorías predefinidas [5]. Esto último es especialmente importante en dominios donde los procesos de etiquetado manual son imprecisos y/o requieren mucho tiempo.

Se puede obtener información valiosa de los antecedentes penales, las cámaras de vigilancia y las aplicaciones móviles de delitos (apps) que proporcionan alertas de seguridad, entre otras fuentes de datos [5], [6]. Las aplicaciones de delitos, en particular, permiten a los usuarios reportar, comunicar y enterarse de robos, actividades sospechosas y otros avisos importantes. La información recopilada de estas fuentes puede ser analizada y utilizada por la policía u otras agencias para aumentar la seguridad de diferentes vecindarios, proporcionando una respuesta rápida a eventos de alta prioridad [7].

Este estudio tiene como objetivo **desarrollar un modelo de aprendizaje profundo capaz de predecir la ocurrencia de tipos específicos de delitos en una determinada área a partir de datos históricos. El propósito principal de este modelo es proporcionar a los municipios y departamentos de policía una herramienta para desplegar patrullas y asignar recursos de manera eficiente.**

Los datos fueron recopilados de una aplicación chilena de denuncias de delitos, que incluye diversos eventos criminales y actividades sospechosas reportadas por la ciudadanía. Bajo la

C. Vairetti, R. Jara y J. T. Queirolo: Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de Los Andes, Santiago, Chile. (e-mail: cvairetti@uandes.cl,rajara1@miuandes.cl,jtqueirolo@miuandes.cl).

S. Maldonado: Department of Management Control and Information Systems, School of Economics and Business, University of Chile, Santiago, Chile. (e-mail: sebastianm@fen.uchile.cl).

R. Weber y J. Roa: Department of Industrial Engineering, FCFM, Universidad de Chile, Santiago, Chile (e-mail: richard.weber@uchile.cl,joaquin.roa.l@uchile.cl).

S. Maldonado, C. Vairetti y R. Weber: Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).

premisa de que los informes previos son indicadores confiables de actividades delictivas futuras, formulamos un problema de clasificación para predecir robos y robos de vehículos en una zona específica. El principal avance metodológico es la adaptación de modelos de aprendizaje profundo basado en grafos y otras arquitecturas de redes para aprovechar la estructura espacial y temporal del problema.

Resultados y Conclusiones

Esta investigación abordó el desafío de predecir la ocurrencia de robos en la Región Metropolitana de Santiago utilizando datos de reportes ciudadanos de la aplicación SOSAFE. Se implementó un modelo de aprendizaje profundo basado en grafos, específicamente una arquitectura *Spatio Temporal Residual Graph Convolutional Neural Network (SRGCNN)*, diseñada para capturar patrones espaciales y temporales en los eventos delictuales. La metodología incluyó la división de la región en grillas de diferentes tamaños, la definición de ventanas temporales para el contexto de predicción, y el balanceo de clases mediante submuestreo controlado debido al severo desequilibrio de datos (solo el 1.5% de los reportes correspondían a robos en la configuración con mayor desbalance). La evaluación del desempeño se realizó utilizando métricas clásicas de clasificación binaria: Exactitud (Accuracy), Precisión, Recall (Sensibilidad), F1-Score y Área Bajo la Curva ROC (AUC-ROC).

Los resultados experimentales indican que el modelo SRGCNN fue ajustado y evaluado bajo diversas configuraciones de conectividad de nodos (espacio-temporal, espacial pura y temporal pura, *ablation study*). La comparación de estas variantes permitió cuantificar la contribución relativa de cada dimensión (espacial y temporal) en la capacidad predictiva. Se destaca que la arquitectura propuesta, al integrar tanto la proximidad geográfica como la continuidad temporal, supera largamente a los métodos tradicionales de clasificación binaria en la predicción de robos en casi todos los escenarios (solo en una de las nueve configuraciones, XGBoost obtuvo un mejor desempeño), ofreciendo una herramienta más sofisticada para anticipar eventos criminales en contextos urbanos.

En términos de conclusiones, se subraya la importancia de un modelamiento espacio-temporal adecuado para la predicción del delito. La capacidad del SRGCNN para procesar datos organizados en grafos, donde los nodos representan ubicaciones y momentos específicos, y las aristas sus relaciones, permite una representación rica de las dinámicas del crimen. Aunque los valores exactos de las métricas de rendimiento no están presentes en el extracto, la metodología empleada y el tipo de modelo seleccionado sugieren un enfoque robusto para abordar la complejidad inherente a la predicción de robos, especialmente en un contexto de datos desbalanceados como los reportes ciudadanos.

Finalmente, este estudio busca ser un aporte significativo al campo de la *predictive policing*, proporcionando una base sólida para el desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones en seguridad pública. La posibilidad de anticipar la ocurrencia de delitos permite una asignación más eficiente de los recursos policiales y el diseño de estrategias preventivas más efectivas, contribuyendo a la reducción de la delincuencia y a mejorar la percepción de seguridad ciudadana en áreas urbanas densamente pobladas. La investigación abre caminos para futuros trabajos que podrían explorar la incorporación de variables socioeconómicas o demográficas, o la aplicación de este marco a otros tipos de delitos.

REFERENCES

[1] X. Chen, Y. Chen, and G. Yin, "Exploring the motivations behind behavior: A theory-driven deep-learning framework for cyberviolence behavior detection," *Decision Support Systems*, p. 114409, 2025.

[2] Z. Yan, F. Peng, and D. Zhang, "Decen: A deep learning model enhanced by depressive emotions for depression detection from social media content," *Decision Support Systems*, p. 114421, 2025.

[3] P. Craja, A. Kim, and S. Lessmann, "Deep learning for detecting financial statement fraud," *Decision Support Systems*, vol. 139, p. 113421, 2020.

[4] G. C. Oatley, "Themes in data mining, big data, and crime analytics," *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 12, no. 2, p. e1432, 2022.

[5] V. Mandalapu, L. Elluri, P. Vyas, and N. Roy, "Crime prediction using machine learning and deep learning: A systematic review and future directions," *Ieee Access*, vol. 11, pp. 60 153–60 170, 2023.

[6] P. Stalidis, T. Semertzidis, and P. Daras, "Examining Deep Learning Architectures for Crime Classification and Prediction," *Forecasting*, vol. 3, no. 4, pp. 1–22, 2021.

[7] R. Solymosi, D. Buil-Gil, L. Vozmediano, and I. S. Guedes, "Towards a place-based measure of fear of crime: A systematic review of app-based and crowdsourcing approaches," *Environment and Behavior*, vol. 53, no. 9, pp. 1013–1044, 2021.

Modelación prescriptiva aplicada a cobranza de deudas utilizando aprendizaje de máquinas y medidas de rentabilidad

Catalina Sánchez, Carla Vairetti, Sebastián Maldonado

***Abstract*—Resumen Extendido**

***Index Terms*—Analítica de Negocios, Cobranza, Contact center, Aprendizaje de Máquinas.**

LOS bancos e instituciones financieras se enfrentan frecuentemente a un elevado número de deudores, lo que resulta en pérdidas financieras significativas. Su objetivo principal es recuperar los montos pendientes de manera rentable y oportuna. Para abordar este desafío, estas entidades a menudo subcontratan los esfuerzos de cobro de deudas a Centros de Contacto. Sin embargo, estos servicios no siempre ofrecen los resultados esperados, como se refleja en el creciente número de deudores en los últimos años.

Esta investigación explora la aplicación de modelos prescriptivos para mejorar los procesos de cobro de deudas. Implementamos una amplia gama de métodos estadísticos y de aprendizaje automático para estimar la probabilidad de que un deudor realice un pago en un futuro cercano. Además, definimos métricas de rentabilidad personalizadas que tienen en cuenta la heterogeneidad del deudor, lo que nos permite seleccionar el modelo predictivo óptimo y su configuración de hiperparámetros basándonos en la rentabilidad, en lugar de depender únicamente de medidas de rendimiento estadístico como la precisión. Finalmente, un análisis de sensibilidad proporciona información valiosa sobre cómo se deben definir diferentes condonaciones para varios perfiles de deudores.

Otra contribución clave es la integración de múltiples fuentes de datos. Mientras que los modelos convencionales se basan principalmente en datos financieros y sociodemográficos, este estudio propone incorporar una fuente adicional —registros de interacción con el cliente de los Centros de Contacto— para mejorar el rendimiento predictivo.

El problema de la cobranza de deudas va más allá de la simple identificación de deudores. La heterogeneidad en el perfil de los deudores (monto adeudado, historial de pagos, riesgo de impago, etc.) implica que una estrategia de cobranza única no es óptima. Las decisiones sobre a quién contactar, cuándo y con qué tipo de oferta (e.g., plan de pagos, condonación parcial) tienen un impacto directo en la rentabilidad de las campañas. Las métricas de rendimiento tradicionales, como la precisión (accuracy) de un modelo predictivo, son insuficientes para guiar estas decisiones, ya que no cuantifican el beneficio económico real de las acciones de cobranza. Se requiere un marco que permita prescribir las mejores acciones para cada deudor, maximizando el retorno de la inversión en los esfuerzos de recuperación.

S. Aliaga y C. Vairetti: Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de Los Andes, Santiago, Chile. (e-mail: cbsanchez@miuandes.cl,cvairetti@uandes.cl).

S. Maldonado: Department of Management Control and Information Systems, School of Economics and Business, University of Chile, Santiago, Chile. (e-mail: sebastianm@fen.uchile.cl).

C. Vairetti y S. Maldonado: Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).

Adaptación de Métricas de Rentabilidad por Segmento desde la Predicción de Fuga

La literatura en *business analytics* ha desarrollado marcos robustos para la predicción de fuga de clientes (churn prediction) que se centran en la maximización de la rentabilidad de las campañas de retención, en lugar de solo predecir la fuga. Un ejemplo destacado es el enfoque multisegmento y multiumbral propuesto por Maldonado et al. (2021) en el contexto de la industria de fondos mutuos [1]. Este trabajo subraya que el Valor de Cliente (CLV) es altamente heterogéneo y que las estrategias de retención deben adaptarse a diferentes segmentos de clientes para maximizar el beneficio.

Esta investigación propone adaptar y extender este marco de métricas de rentabilidad por segmento al dominio de la cobranza de deudas. La analogía es directa y poderosa:

- El **Valor de Vida del Cliente (CLV)** en la predicción de fuga se traduce en el **Valor Potencial de Recuperación (VPR)** o el monto de la deuda pendiente en la cobranza. Los deudores, al igual que los clientes, presentan una heterogeneidad considerable en este valor.
- Los **costos de las campañas de retención** se corresponden con los **costos de los esfuerzos de cobranza** (e.g., llamadas, mensajes, personal).
- La **probabilidad de fuga** se equipara con la **probabilidad de pago** por parte del deudor.
- El **beneficio de retener** a un cliente se asemeja al **beneficio de recuperar** una porción de la deuda.

Al igual que en la predicción de fuga, el objetivo no es meramente predecir qué deudores pagarán, sino identificar a quiénes dirigir los esfuerzos de cobranza para maximizar la rentabilidad total, considerando los costos asociados y el VPR de cada deudor.

Propuesta Metodológica para la Cobranza de Deudas

Para abordar el problema de la cobranza de deudas desde una perspectiva de rentabilidad por segmento, nuestra propuesta metodológica incluye los siguientes elementos:

Se implementará una amplia gama de métodos estadísticos y de aprendizaje automático (e.g., regresión logística, árboles de decisión, *Random Forests*, redes neuronales, máquinas de vectores de soporte) para estimar la probabilidad de que un deudor realice un pago en un futuro cercano. Estos modelos servirán como base para las decisiones prescriptivas.

Se definirán métricas de rentabilidad personalizadas que extienden el concepto de *Maximum Profit Criterion (MPC)* y *Expected Maximum Profit Criterion (EMPC)* [2] a un contexto multisegmento para la cobranza. Esto implica:

- **Función de Beneficio por Deudor:** Una función que cuantifique el beneficio neto de un esfuerzo de cobranza sobre un deudor específico, considerando el monto recuperado, el costo del esfuerzo y la probabilidad de éxito.
- **Segmentación de Deudores:** Los deudores serán clasificados en segmentos basados en su heterogeneidad, principalmente en función de su Valor Potencial de Recuperación (VPR) (e.g., mediante cuantiles del monto adeudado) y otras características relevantes como el historial de pagos y el perfil de riesgo.
- **Umbrales de Decisión Óptimos por Segmento:** Se optimizarán umbrales de decisión específicos para cada segmento de deudores. Esto permitirá una asignación diferenciada de los esfuerzos de cobranza, priorizando aquellos segmentos y deudores que prometen la mayor rentabilidad esperada.

Este enfoque multi-umbral y multisegmento es crucial para capturar las diferencias en el valor y el comportamiento de los deudores, y para asignar recursos de manera óptima.

Un componente clave de la gestión de deudas es la definición de políticas de condonación o reestructuración. Se realizará un análisis de sensibilidad para evaluar cómo diferentes niveles de ”condonación” (e.g., descuentos en el monto total, planes de pago flexibles) impactan la probabilidad de pago y la rentabilidad neta para diversos perfiles de deudores. Esto proporcionará información valiosa para diseñar ofertas personalizadas que maximicen la recuperación.

Mientras que los modelos convencionales de predicción de pago suelen depender de datos financieros (saldos, historial crediticio) y sociodemográficos (edad, ubicación), esta investigación propone incorporar una fuente de datos adicional y rica en información: los **registros de interacción con el cliente de los Centros de Contacto**. Estos registros pueden incluir transcripciones de llamadas, duraciones, número de contactos, y resultados de interacciones previas. La hipótesis es que el análisis de estas interacciones puede revelar patrones de comportamiento y señales de propensión al pago no capturadas por los datos tradicionales, mejorando significativamente el rendimiento predictivo de los modelos.

Contribuciones Esperadas

Esta investigación busca realizar varias contribuciones significativas:

- **Desarrollo de un Marco Prescriptivo:** Proporcionar un marco metodológico para optimizar la gestión de cobranza de deudas desde una perspectiva de maximización de la rentabilidad.
- **Mejora de la Rentabilidad:** Demostrar empíricamente que la aplicación de métricas de rentabilidad por segmento puede conducir a una mejora sustancial en la recuperación de deudas en comparación con enfoques basados únicamente en el rendimiento estadístico o estrategias de cobranza uniformes.
- **Toma de Decisiones Estratégicas:** Ofrecer a las instituciones financieras una herramienta avanzada para la toma de decisiones sobre la asignación óptima de recursos y el diseño de estrategias de cobranza personalizadas.
- **Valor de Datos de Interacción:** Cuantificar el valor añadido de la integración de datos de interacción de Centros de Contacto en la predicción de pago y la optimización de la cobranza.
- **Adaptación de Conocimiento:** Validar la adaptabilidad y el poder de generalización de los marcos de optimización de rentabilidad desarrollados en otros dominios (como la predicción de fuga) a nuevos desafíos de negocio.

Conclusión y Trabajo Futuro

La aplicación de métricas de rentabilidad por segmento, inspiradas en los avances en la predicción de fuga de clientes, ofrece una vía prometedora para transformar la gestión de cobranza de deudas de una tarea reactiva a una estrategia proactiva y orientada al beneficio. Este enfoque no solo busca mejorar la eficiencia operativa, sino también maximizar el valor recuperado de la cartera de deudores.

Como trabajo futuro, se contempla la implementación de este marco en un entorno real para validar sus beneficios en la práctica. Se podría explorar la optimización de incentivos de condonación dinámicos por segmento, así como la incorporación de técnicas de *uplift modeling* para identificar deudores que solo pagarían si son contactados con una estrategia específica, evitando esfuerzos en ”causas perdidas” o ”deudores durmientes” que podrían pagar sin intervención.

REFERENCES

[1] S. Maldonado, G. Domínguez, D. Olaya, and W. Verbeke, “Profit-driven churn prediction for the mutual fund industry: A multisegment approach,” *Omega*, vol. 100, p. 102380, 2021.

[2] T. Verbraken, W. Verbeke, and B. Baesens, “A novel profit maximizing metric for measuring classification performance of customer churn prediction models,” *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, vol. 25, no. 5, pp. 961–973, 2012.

¿Qué Hace A Un Buen Vendedor? Aprendizaje Profundo Aplicado a Upselling En El Contexto De Una Organización Social

Samuel Aliaga, Carla Vairetti, Rosario Macera, Sebastián Maldonado

***Abstract*—Resumen Extendido**

***Index Terms*—Analítica de Negocios, HR Analytics, Aprendizaje de Máquinas, Upselling.**

LA inteligencia artificial (IA) ha demostrado ser una herramienta transformadora en diversas industrias, gracias a su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos complejos e identificar patrones que superan las capacidades humanas [1]. En el contexto de los centros de llamadas, esta tecnología ofrece un vasto potencial, especialmente en el análisis de las interacciones entre operadores y clientes [2]. Las organizaciones sociales, que operan con recursos limitados y dependen en gran medida de las donaciones, pueden beneficiarse enormemente de la IA para optimizar sus operaciones de captación de fondos.

Esta investigación se enfoca en el centro de llamadas del Hogar de Cristo, una destacada organización social en Chile. Los agentes de esta fundación tienen la compleja tarea de persuadir a individuos para que realicen aportes desinteresados, una labor que genera un gran volumen de datos conversacionales. El análisis de estas interacciones, mediante el Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) [3], busca desvelar los elementos clave que definen una interacción exitosa o fallida en el contexto de un ”reajuste” (aumento del monto de donación). El fin último es no solo identificar estos patrones, sino también desarrollar técnicas que mejoren las interacciones de los agentes, permitiendo al Hogar de Cristo ampliar su labor de asistencia a personas en situación de pobreza y vulnerabilidad.

La hipótesis que guía este estudio es la siguiente: *Existen patrones identificables mediante inteligencia artificial que permiten reconocer a un buen agente en el contexto de un centro de llamadas de una organización social que busca aumentar las recaudaciones.*

Esta hipótesis postula que, más allá de la intuición humana, las interacciones conversacionales contienen señales y estructuras que pueden ser detectadas y cuantificadas por modelos de IA basados en transformers, tales como BERT [4], para predecir el resultado de una llamada y, consecuentemente, identificar las características de un desempeño exitoso .

El objetivo general de esta investigación es encontrar los patrones dentro de las conversaciones de los agentes que permitan definir aquellas interacciones o palabras clave al momento de convencer a un cliente para poder obtener una mayor recaudación.

La metodología de esta investigación se estructura en cinco ejes fundamentales para el análisis de las llamadas de reajuste del Hogar de Cristo, proporcionadas por Entel.

Construcción del Corpus Textual

El corpus inicial se conformó a partir de grabaciones de llamadas telefónicas de campañas de reajuste del Hogar de Cristo (años 2022, 2023 y parte de 2024).

Las grabaciones fueron obtenidas de un servidor SFTP. Para convertir el audio a texto, se empleó el modelo de transcripción `Whisper-X` (versión `large-v3`), basado en `Whisper` de OpenAI. Esta herramienta no solo transcribió el contenido, sino que también realizó Detección de Actividad de Voz (VAD) y diarización, identificando los turnos de habla del captador y del cliente.

Para asegurar la calidad del corpus, se aplicaron dos criterios de filtrado:

- Cada turno de habla debe estar correctamente etiquetado como `[CAPTADOR]` o `[CLIENTE]`.
- Debe existir una interacción mínima de al menos dos intervenciones por parte del captador y del cliente.

Este proceso redujo el número de registros, pero garantizó la coherencia y completitud de los diálogos.

Se implementó un proceso de segmentación temática para mitigar el sesgo de que el modelo aprenda de los indicadores de resultado explícitos al final de la llamada. Se entrenó un modelo de lenguaje adicional para dividir cada transcripción en cuatro secciones lógicas, basadas en el guion de la campaña:

- **Apertura:** Saludo, identificación, introducción a la campaña y presentación de la propuesta de reajuste.
- **Interacción:** Diálogo de negociación, preguntas, objeciones y respuestas hasta la decisión final del cliente. Esta es la sección clave para el análisis de persuasión.
- **Resultado:** Pasos administrativos post-decisión (confirmación, actualización de datos, información de contacto).
- **Cierre:** Despedida y agradecimiento.

Para el entrenamiento de los modelos de clasificación de resultados, se decidió utilizar exclusivamente los segmentos

S. Aliaga y C. Vairetti: Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de Los Andes, Santiago, Chile. (e-mail: sialiaga@miuandes.cl,cvairetti@uandes.cl).

R. Macera: Facultad de Economía y Administración, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile (e-mail: rosario.macera@uc.cl).

S. Maldonado: Department of Management Control and Information Systems, School of Economics and Business, University of Chile, Santiago, Chile. (e-mail: sebastianm@fen.uchile.cl).

C. Vairetti y S. Maldonado: Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).

de **Apertura** e **Interacción**, forzando al modelo a aprender de las características lingüísticas y estratégicas de la persuasión.

Se realizó ingeniería de características para complementar el análisis textual, construyendo un conjunto de datos tabulares a partir de las fuentes de audio y texto.

Se generaron características basadas en:

- **Métricas de Conteo:** Longitud de la conversación, volumen de habla por interlocutor, número de turnos por interlocutor.
- **Análisis de Sentimiento:** Utilizando la librería `PySentimiento`, se obtuvo la polaridad global de la llamada y la polaridad agregada por interlocutor.
- **Estadísticas Conversacionales Derivadas:** Longitud promedio de turno y proporción de participación de cada hablante.

Se aplicó un proceso de reducción de dimensionalidad, eliminación de ruido y colinealidad:

- **Tratamiento de valores atípicos (outliers):** Identificación y eliminación o imputación (media/moda, o imputación múltiple para umbrales mayores al 5%).
- **Transformación de variables categóricas:** La polaridad se binarizó (Positiva vs. No-Positiva) y se convirtió a una representación numérica (one-hot encoding).
- **Normalización:** Variables numéricas escaladas a un rango de $[0, 1]$.
- **Selección de características:** Test de Chi-cuadrado para variables categóricas y prueba F de ANOVA (`SelectKBest` de `scikit-learn`) para variables numéricas.

Se aplicaron transformaciones al corpus textual para normalizar la estructura, evitar sesgos y reducir elementos secundarios.

- **Limpieza de Espacios en Blanco y Saltos de Línea:** Eliminación de saltos de línea, tabulaciones y espacios múltiples.
- **Estandarización de etiquetas de hablante:** Reemplazo de "`CLIENTE`" y "`CAPTADOR`" por `<cliente>` y `<captador>`.
- **Delimitación de segmentos:** Cada segmento es tratado como un registro independiente.

Por motivos éticos y para asegurar la generalización del modelo, se reemplazaron menciones a la organización, nombres propios, RUT, correos, teléfonos y otros datos sensibles por etiquetas genéricas como `<organizacion>`, `<nombre>`, `<rut>`, `<numero>` o `<telefono>`.

Modelos Transformer para la Clasificación de Textos

Se realizó un fine-tuning sobre un conjunto diverso de modelos preentrenados basados en la arquitectura Transformer [5] para clasificar binariamente los resultados de las llamadas (Éxito/Fracaso). La métrica principal fue AUC-ROC, utilizando un 70% para entrenamiento y 30% para evaluación en una GPU NVIDIA A100 en Google Colaboratory.

La selección de modelos cubrió diferentes ejes de análisis:

- **Modelos tradicionales:** BERT (`BERT-base-multilingual-uncased`) y ROBERTA (`XLM-ROBERTa-base`) como línea base.
- **Modelos especializados en español:** BETO (`BERT-base-spanish-wwm-uncased`) y TULIO (`Tulio-chilean-spanish-bert`), desarrollados para el idioma español y textos chilenos, respectivamente.
- **Modelos de arquitectura reciente:** ModernBert (`ModernBERT-base`), para evaluar el impacto de las mejoras arquitectónicas más actuales.

Los hiperparámetros comunes fueron: tamaño del lote (batch size) de 32, tasa de aprendizaje (learning rate) de 2×10^{-5}, longitud máxima de secuencia de 512 tokens y 5 épocas de entrenamiento.

Resultados y Análisis

El corpus textual final consta de 11.933 transcripciones, con una distribución de 60.1% "Fracaso" (7.173 llamadas) y 39.9% "Éxito" (4.760 llamadas). No se aplicaron técnicas de balanceo de clases para mantener una distribución realista.

Los resultados del fine-tuning mostraron un rendimiento general alto, con cuatro de los cinco modelos superando un AUC-ROC de 0.90.

El modelo **Tulio** (preentrenado con corpus chileno) obtuvo el mejor desempeño global, con una ventaja marginal en AUC-ROC sobre BERT, pero más pronunciada en Exactitud ($+0.6$ p.p.) y Puntuación F1 ($+0.7$ p.p.). Esto respalda la hipótesis de que un corpus de preentrenamiento alineado con el dominio es crucial [6].

Se utilizó LIME [7] para analizar el comportamiento de Tulio, el mejor modelo, en tres subconjuntos de llamadas: Predicciones Correctas de Alta Confianza, Errores de Alta Confianza y Casos Límite.

- **Predicciones Correctas de Alta Confianza:** Para "Éxito", el modelo ponderó palabras que apelan a la misión y empatía (niños, esfuerzo, chilenos). Para "Fracaso", se asoció con presión financiera (extra, mensual) o duda (podría). La palabra "ayudar" también indicó fracaso, probablemente en contextos de negación. "Aporte" apareció en ambas, demostrando su dependencia contextual.
- **Errores de Alta Confianza:**
  - **Falsos Positivos (Éxito predicho, pero Fracaso real):** El modelo fue engañado por un proceso que parecía ideal (meses, podemos), pero el objetivo específico de la campaña no se cumplió.
  - **Falsos Negativos (Fracaso predicho, pero Éxito real):** El modelo predijo "Fracaso" al detectar objeciones (difícil, situación), subestimando la capacidad del agente para revertir la situación.
- **Casos Límite (Predicciones Ambiguas):** Palabras como "meses" y "mensual" fueron influyentes para ambas clases, indicando la coexistencia de señales de éxito y fracaso en la misma conversación. Esta ambigüedad refleja la complejidad de una negociación humana real.

El análisis transversal reveló que palabras como *aporte*, *meses*, *señora* y *posible* tienen un impacto predictivo que es enteramente definido por el contexto conversacional. Por

ejemplo, ”aporte” es señal de éxito en el contexto de impacto social, pero de fracaso en una transacción financiera. Esta dependencia contextual es el rasgo más significativo del modelo, demostrando su capacidad para interpretar cómo el flujo de la conversación modifica el valor predictivo de los términos, y no solo identificar palabras aisladas.

Conclusiones

La investigación confirma que existen patrones conversacionales identificables mediante IA que permiten predecir el éxito o fracaso en campañas de recaudación de fondos. La elección de un modelo *Transformer* preentrenado en un corpus lingüístico y culturalmente alineado (como Tulio para el español chileno) es fundamental para lograr un alto rendimiento, superando incluso arquitecturas más recientes pero con desajuste de dominio. La interpretabilidad (XAI) reveló que el modelo no se basa en atajos superficiales, sino que aprende la dependencia contextual de las palabras, lo que indica una comprensión profunda de la dinámica de la conversación.

Los patrones identificados, especialmente aquellos con dependencia contextual, ofrecen información valiosa para la capacitación de agentes. Por ejemplo, el uso de ”aporte” debe ser cuidadosamente enmarcado. Comprender las palabras que engañan al modelo (Falsos Positivos) o las que indican objeciones no superadas (Falsos Negativos) permite a los supervisores enfocar la retroalimentación de manera más efectiva. La segmentación temática de las llamadas es una herramienta práctica para aislar las fases críticas de la negociación y mejorar la calidad de los datos de entrenamiento.

REFERENCES

[1] P. Harrington, *Machine Learning in Action*. Simon and Schuster, 2012.

[2] S. D. Lukitasari and F. P. Hidayat, “Deep learning-based complaint classification for indonesia telecommunication company’s call center,” *Proceedings of the Proceedings of the 7th Mathematics, Science, and Computer Science Education International Seminar, MSCEIS 2019, 12 October 2019, Bandung, West Java, Indonesia*, 2020. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:221641341

[3] Y. Kang, Z. Cai, C.-W. Tan, Q. Huang, and H. Liu, “Natural language processing (nlp) in management research: A literature review,” *Journal of Management Analytics*, vol. 7, no. 2, pp. 139–172, 2020.

[4] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, “Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding,” 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1810.04805

[5] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin, “Attention is all you need,” 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1706.03762

[6] X. Jiang, X. Cheng, and Z. Li, “Why pre-training is beneficial for downstream classification tasks?” 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2410.08455

[7] M. T. Ribeiro, S. Singh, and C. Guestrin, “”why should i trust you?”: Explaining the predictions of any classifier,” 2016. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1602.04938

Modelo Basado en Inteligencia Artificial para Predecir el Éxito del Proceso de Baja de Sedación de Pacientes en Ventilación Mecánica

Camila Zumaeta, Carla Vairetti, Sebastián Maldonado

***Abstract*—Resumen Extendido**

***Index Terms*—Aprendizaje profundo, Inteligencia Artificial, Ventilación Mecánica Invasiva.**

LA Ventilación Mecánica Invasiva (VMI) es un soporte vital en las Unidades de Cuidados Intensivos (UCI). Su manejo se divide en tres fases: la fase controlada, la fase de transición (disminución de sedación) y el destete final. La fase de transición es un punto de decisión crucial; una reducción prematura de la sedación puede causar retrocesos, mientras que una tardía aumenta el riesgo de infecciones y prolonga la estancia en UCI [1].

Actualmente, la decisión de iniciar la baja de sedación depende en gran medida de la experiencia del equipo clínico, lo que introduce una variabilidad significativa en los resultados [2]. La escasez de personal especializado agrava esta situación. Por ello, este proyecto se enfoca en desarrollar un modelo predictivo basado en inteligencia artificial (IA) que integre múltiples fuentes de datos (series temporales, eventos discretos y datos demográficos) para ofrecer un soporte robusto y objetivo a la toma de decisiones clínicas.

Metodología

El estudio utilizó una base de datos multicéntrica de pacientes en VMI, de la cual se extrajeron 194 variables divididas en cuatro categorías:

- **Tipo I (Series Temporales):** Datos del monitor y ventilador mecánico cada 5 minutos.
- **Tipo II (Variables Derivadas):** Calculadas a partir de los datos tipo I.
- **Tipo III (Eventos Discretos):** Registros diarios como exámenes e intervenciones.
- **Tipo IV (Datos Demográficos):** Información estática del paciente.

Es importante notar que el éxito en la baja de sedación es una tarea muy compleja para el médico: la tasa de éxito es cercana al 50%. Debido a esto, desempeños superiores a un 70% de acierto pueden ser considerados como precisos en esta aplicación.

C. Zumaeta y C. Vairetti: Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de Los Andes, Santiago, Chile. (e-mail: cazumaeta1@miuandes.cl,cvairetti@uandes.cl).

S. Maldonado: Department of Management Control and Information Systems, School of Economics and Business, University of Chile, Santiago, Chile. (e-mail: sebastianm@fen.uchile.cl).

C. Vairetti y S. Maldonado: Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).

El desarrollo metodológico se estructuró en dos líneas de trabajo paralelas para abordar la heterogeneidad de los datos:

Modelos de Machine Learning Tradicional (Tabulares)

Para estos modelos, los datos secuenciales fueron transformados en características agregadas (media, mínimo, máximo, desviación estándar) en ventanas de 12, 16, 24, 36 y 48 horas previas al descenso de sedación. Se entrenaron y evaluaron ocho algoritmos, incluyendo Regresión Logística, SVM, Random Forest, XGBoost y CatBoost. El preprocesamiento incluyó imputación de valores nulos y codificación de variables categóricas. La optimización de hiperparámetros se realizó con validación cruzada estratificada.

Modelos de Deep Learning Secuencial (Series Temporales)

Se utilizaron las secuencias de datos del monitor y ventilador en ventanas de 12 y 24 horas. Se evaluaron siete arquitecturas de redes neuronales, entre ellas LSTM, GRU, BiLSTM con atención y modelos más avanzados como GRU-D (diseñado para manejar datos faltantes) y RETAIN (que incorpora mecanismos de atención interpretables). Se definieron cuatro subconjuntos de datos experimentales basados en la cobertura y fuente de las señales (monitor, ventilador, o ambos) para evaluar la robustez de los modelos ante la falta de datos.

La evaluación de todos los modelos se basó en métricas como el Área Bajo la Curva ROC (AUC), exactitud, precisión, sensibilidad (recall) y F1-score.

Resultados y Análisis

Los resultados muestran un desempeño prometedor en ambas líneas de modelado, aunque con diferencias notables en precisión y complejidad.

Resultados de Modelos Tabulares

El modelo **CatBoost Classifier** alcanzó el mejor rendimiento, con un **AUC de 0.798** y una exactitud del 75.7%. Este modelo demostró un buen equilibrio entre sensibilidad (66.7%) y especificidad (84.2%), superando a otros modelos como SVM y Naive Bayes (AUC $\approx$ 0.73).

El análisis de importancia de variables mediante la técnica SHAP reveló que los datos provenientes del ventilador mecánico son los predictores más influyentes. Específicamente, un mayor volumen de aire exhalado por el paciente, tanto en respiraciones individuales como en el total

por minuto, se asoció fuertemente con una predicción de éxito. En contraste, otros factores indicaron una mayor probabilidad de fracaso: el requerimiento de dosis elevadas de sedantes, una frecuencia cardíaca que no desciende a niveles bajos (según los registros del monitor), y una puntuación alta en la escala que mide la disfunción orgánica del paciente (SOFA), se asociaron negativamente con el éxito del proceso.

Resultados de Modelos de Deep Learning

Entre los modelos secuenciales, la arquitectura **RETAIN**, entrenada con datos del ventilador en una ventana de 12 horas, obtuvo el mejor desempeño, con un **AUC de 0.686** y una exactitud del 71.1%. Este modelo destacó por su alta precisión (81%) para predecir fracasos, aunque con una sensibilidad del 62%. Otros modelos como TA-RNN también mostraron alta sensibilidad para detectar fracasos, pero a costa de una especificidad muy baja.

Los experimentos demostraron que las señales del ventilador en ventanas cortas (12h) contenían la información más relevante. Ampliar la ventana a 24 horas o incluir datos del monitor no mejoró el rendimiento, probablemente debido al ruido introducido por la imputación de datos faltantes.

Es importante notar que estos resultados se obtuvieron solo con las fuentes secuenciales, ignorando información tabular valiosa del paciente que sí fue considerada en CatBoost. Como trabajo futuro, se explorarán modelos multimodales capaces de incorporar toda la información disponible, resultando en una comparación justa entre modelos.

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares demuestran la viabilidad de utilizar modelos de inteligencia artificial para predecir el éxito en la baja de sedación de pacientes en VMI.

Los **modelos tabulares**, y en particular CatBoost, ofrecen una alta precisión predictiva con la ventaja de ser computacionalmente menos costosos y más fáciles de interpretar. Las variables identificadas por SHAP, principalmente relacionadas con la mecánica ventilatoria y la dosis de sedación, coinciden con el conocimiento clínico y proporcionan una base sólida para la construcción de herramientas de apoyo.

Los **modelos de aprendizaje profundo**, aunque con un AUC ligeramente inferior, son prometedores. La arquitectura RETAIN no solo fue competitiva, sino que su capacidad para identificar momentos y variables críticas en una secuencia temporal la convierte en una herramienta potente para el análisis clínico dinámico. El rendimiento de estos modelos está fuertemente ligado a la calidad y completitud de los datos, lo que subraya la necesidad de mejorar los sistemas de recolección de datos en la UCI.

En resumen, la investigación sienta las bases para el desarrollo de sistemas de apoyo a la decisión clínica. Futuras líneas de trabajo deberían explorar modelos híbridos que combinen la interpretabilidad de los datos estáticos con el poder predictivo de las secuencias temporales, así como la validación prospectiva de estos modelos en un entorno clínico real.

REFERENCES

[1] A. Luetz, A. Goldmann, S. Weber-Carstens, and C. Spies, "Weaning from mechanical ventilation and sedation," *Current Opinion in Anaesthesiology*, vol. 25, no. 2, pp. 164–169, Apr 2012. [Online]. Available: https://journals.lww.com/00001503-201204000-00008

[2] E. Tobar, A. Montecinos, S. Pino, P. Aspée, S. Rivas, D. Prat, R. Asenjo, and J. Castro, "Sedación guiada por protocolo versus manejo convencional en pacientes críticos en ventilación mecánica," *Revista Médica de Chile*, vol. 136, no. 6, pp. 711–718, 2008. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0034-98872008000600004&script=sci_arttext

Session N°3 – Track N°2

Port Logistics

Chair: González-Ramírez, R. *(Universidad de los Andes)*
Place: G6-055
Time: 15:40 – 16:55

A Non-homogeneous Negative Binomial Autoregressive Model for Forecasting Port Truck Arrivals

Time: 15:40 – 15:55
Authors:

- Valenzuela-Riquelme, V. *(Universidad Andrés Bello)*
- Favereau, M. *(Universidad de los Andes)*

Container Dwell Time Determinants at Multipurpose Maritime Terminals: From Multi-port Analysis to Prediction Enhancement

Time: 16:00 – 16:15
Authors:

- Muñoz-Herrera, S. *(Universidad del Desarrollo)*
- Suchan, K. *(Universidad Diego Portales)*
- González-Ramírez, R. *(Universidad de los Andes)*

Programación Eficiente de Personal Portuario Mediante Optimización Entera Mixta: Caso de Estudio en Terminal Pacífico Sur (Chile)

Time: 16:20 – 16:35
Authors:

- Mercado-Morales, Y. *(Universidad de los Andes)*
- López-Ospina, H. *(Universidad de Los Andes)*
- Suchan, K. *(Universidad Diego Portales)*
- González-Ramírez, R. *(Universidad de los Andes)*

Port Call Learning and Optimization Challenges in the Netherlands: The PortCall.Zero Project

Time: 16:40 – 16:55
Author: Schulte, F. *(Delft University of Technology)*

A non-homogeneous negative binomial autoregressive model for forecasting port truck arrivals

1st Vicente Valenzuela-Riquelme
Department of Engineering Sciences
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
v.valenzuelariquelme@uandresbello.edu

2nd Marcel Favereau
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Andes, Chile
Santiago, Chile
mjfavereau@uandes.cl

***Abstract*—This research presents a novel approach to modeling daily truck arrivals at a major Chilean port proposing a Non-Homogeneous Autoregressive Negative Binomial Process (NH-ARNBP). Traditional count models often fail to account for the combined effects of non-stationarity, autocorrelation, and overdispersion observed in real-world port operations. To address this gap, we propose a methodology that transforms the original discrete series using a logit function, decomposes the trend and seasonality, fits an autoregressive model to the residuals, and finally applies inverse transformation for a non-homogeneous negative binomial process. Our empirical application uses a dataset of over 700 daily truck arrival observations from 2021 to 2023, showing clear temporal dependencies and seasonal effects. The results show a marked improvement in predictive performance over traditional non-homogeneous Poisson models, with substantially better empirical coverage (85.2% vs. 7.9%), lower logarithmic scores, and more informative predictive distributions. This modeling framework offers a promising tool for short-term logistical planning and decision-making in complex port environments.**

***Index Terms*—Negative Binomial Process, Truck Arrivals, Autoregressive Model, Non-stationarity, Probabilistic Forecasting.**

I. Introduction

The sustained growth of international trade has positioned seaports as critical strategic nodes within global logistic chains. In Latin America, over 90% of international commerce utilizes maritime transport, a significant fact especially for Chile, which hosts major ports such as Valparaíso and San Antonio. However, these ports face considerable challenges due to the high variability in daily truck arrivals, causing operational congestion, increased logistical costs, and negative externalities such as pollutant emissions. Predicting and effectively managing these truck arrivals is therefore crucial for optimizing logistic resources and reducing operational costs.

Non-homogeneous Poisson processes (NHPP) have traditionally been employed in the literature to model discrete events with time-varying rates through an intensity function $\lambda(t)$ [1], [2]. However, phenomena such as overdispersion (variance exceeding the mean) and temporal dependency necessitate more sophisticated models. Integer-valued Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity (INGARCH) models [3], [4] and negative binomial-based models [5], [6] have demonstrated effectiveness by explicitly capturing overdispersion through additional shape and probability parameters, particularly in logistic and epidemiological contexts [7]–[9].

The main objective of this research is to develop and validate a robust autoregressive statistical model based on a non-homogeneous negative binomial process (NH-ARNBP) to accurately predict daily truck arrivals at a Chilean port, explicitly incorporating characteristics such as non-stationarity, overdispersion, and temporal autocorrelation.

II. Proposed Models

In this research, it is proposed a combination between an autoregressive process and a non-homogeneous negative binomial process, based on the scheme depicted in Figure 1 and on the following methodological approach:

1) Original series: An original discrete time series (counting process) $\{Y_t\}_{t\in T}$ of daily port truck arrivals is considered. T corresponds to the planning horizon.
2) Standardization: The original time series $\{Y_t\}_{t\in T}$ is first standardized to obtain a [0,1]-measured time series as
$$U_t = \frac{Y_t}{\max\{\boldsymbol{Y}\}+1} \quad \forall t \in T.$$
3) Logit transformation: The standardized time series $\{U_t\}_{t\in T}$ is then transformed with a logit function, to obtain a real-valued time series
$$L_t = \ln\left(\frac{U_t}{1-U_t}\right) \quad \forall t \in T.$$
Note that the logit transformation, as the standardization procedure, modifies the absolute behavior of $\{Y_t\}_{t\in T}$, but they behave relatively similarly. See subplots (a), (b), and (c) of Figure 1 to corroborate this; the behavior is the same, but only the (vertical axes) scale differs.
4) Autoregressive model: Over the real-valued time series $\{L_t\}_{t\in T}$, an autoregressive model AR(P) can be fitted.

This work was supported by FIC-R-2023 Gobierno Regional de Valparaíso BIP 40058874.

But first, an additive decomposition has to be made in order to eliminate trend and seasonality patterns. For this, we consider $L_t = \mu_t + s_t + r_t$ for each $t \in T$. The trend μ_t is estimated as a linear regression against time (t), whereas seasonality (s_t) is modeled by a sine-cosine (harmonic) regression. Then, subtracting the trend and the seasonality, we have the residuals $L_t - \mu_t - s_t = r_t$, for which an AR(P) model is considered as

$$r_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^{P} \beta_i r_{t-i} + \varepsilon_t \quad \forall t \in T,$$

where $\boldsymbol{\varepsilon}$ corresponds to a white noise process, typically considered as Gaussian. In order to maintain a tractable model, we consider the Bayesian information criteria when finding the order P. We also consider ordinary least squares to adjust the values of $\boldsymbol{\beta}$.

With the AR(P) model fitted, several (logit-transformed) daily truck arrival trajectories can be simulated based on different realizations of $\boldsymbol{\varepsilon}$, named $\hat{\boldsymbol{r}} = \{\hat{r}_{t,\omega}\}_{t\in T, \omega\in\Omega}$ (subplot (d) of Figure 1). Here, Ω corresponds to the set of trajectories. This procedure allows us to capturethe temporal correlation between truck arrivals. However, two challenges remain: recovering the scale of the original time series ($\{Y_t\}_{t\in T}$) and capturing non-stationarity. The first is partially covered in step 5), whereas both will be totally covered in step 6).

5) Detransformation: With the trajectories $\hat{\boldsymbol{r}}$, we recover the logit-based series for each trajectory $\omega \in \Omega$ as

$$\hat{L}_{t,\omega} = \hat{\mu}_t + \hat{s}_t + \hat{r}_{t,\omega} \quad \forall t \in T,$$

where $\hat{\mu}_t$ and $\hat{s}_t$ correspond to the fitted trend and seasonality. The standardized-based series is recovered by applying the inverse of the standardization, i.e.,

$$\hat{U}_{t,\omega} = \frac{\exp \hat{L}_{t,\omega}}{1 + \exp \hat{L}_{t,\omega}} \quad \forall t \in T, \omega \in \Omega.$$

With this, we reconstruct the series on the [0,1] scale (subplot (e) of Figure 1). We now move onto step 6), to recover the same scale of the original time series, along with the corresponding non-stationarity.

6) Inverse transformation: A well known technique to generate realizations of a (discrete or continuous) random variable X with probability mass (discrete) or density (continuous) function $f_X(x)$ is the inverse transform method. The general assumption behind this is that the cumulative distribution function (CDF) of the random variable X, $F_X(x)$, is considered as a $U(0,1)$ distribution. Therefore, a realization u of $U \sim U(0,1)$ is transformed into a realization x of $X \sim f_X(x)$ through the inverse CDF, $F_X^{-1}(x)$, of X.

Based on the above, we consider that the truck arrival process follows a negative binomial distribution, with its distribution parameters varying monthly, i.e., a non-homogeneous negative binomial process with

$$f_X^m(x) = \text{NB}(x|\tau_m, \rho_m) = \binom{x+\tau_m-1}{x} \rho_m^{\tau_m} (1-\rho_m)^x.$$

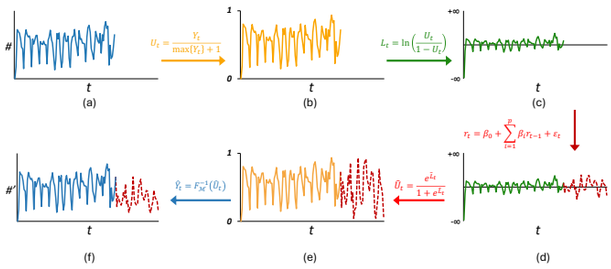


Fig. 1. Methodological scheme of the proposed model

for all $x \in \mathbb{N}_0$. For each month $m \in M$ (from January to December), the estimators of the parameters are

$$\hat{\tau}_m = \frac{\overline{Y}_m^2}{S_m^2 - \overline{Y}_m}, \qquad \hat{\rho}_m = \frac{\overline{Y}_m}{S_m^2},$$

where $\overline{Y}_m$ and S_m^2 are the sample mean and variance of the month m, respectively. Then, for a month m, given a realization u from $U \sim U(0,1)$, we obtain a realization x from $X \sim f_X^m(x)$ via the inverse transform method (directly using the corresponding percent point function, ppf). With this, we totally recover the same scale and non-stationarity of the original time series. This proposed model is called NH-ARNBP (non-homogeneous negative binomial autoregressive process).

The accuracy of the NH-ARNBP forecasts will be compared with a similar model, the NH-ARPP, constituted by the same methodology, but with the different that considers a Poisson process instead a negative binomial one. The Poisson process distribution parameter, the monthly rate λ_m, is estimated using its maximum likelihood estimator.

III. Computational Experiments

This research is based on a case study focusing on truck arrivals at a major multipurpose port terminal in central Chile, using a dataset of daily observations from January 1, 2020, to December 31, 2023. We consider the first two years as the training set, and the last year a the testing set. To compare the forecast accuracy of both models, NH-ARNBP and NH-ARPP, the following probabilistic performance metrics (among others) were used:

- Prediction interval coverage (PIC): To assess whether the prediction intervals adequately reflect the observed variability, we use the empirical PIC at a given level α. This metric quantifies the proportion of times the observed value y_t^{obs} lies within the predictive interval $[q_t^{(\alpha/2)}, q_t^{(1-\alpha/2)}]$

$$\text{PIC}_\alpha = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N} \mathbb{1}\left(q_t^{(\alpha/2)} \leq y_t^{\text{obs}} \leq q_t^{(1-\alpha/2)}\right),$$

where $\mathbb{1}(\cdot)$ is the indicator function. A value of $\text{PIC}_\alpha \approx 1 - \alpha$ indicates that the width and location of the

predictive intervals are well calibrated, thus reflecting appropriate uncertainty quantification. Thus, higher values indicate better forecasts.

- Logarithmic score (LS): Penalizes the forecast based on the likelihood assigned to the actual observation y_t under the predictive distribution $f_t(\cdot)$ by

$$\text{LS}_t = -\log\left(f_t(y_t^{\text{obs}})\right).$$

Here, lower values indicate better forecasts

- Continuous ranked probability score (CRPS): It is particularly useful in contexts with high uncertainty or broad random variable support, as it evaluates both calibration and sharpness of the predictive distribution. For each time t, given an observed value y_t^{obs} and the simulated forecast trajectories $\{y_{t,\omega}^{\text{fore}}\}_{\omega\in\Omega}$, the CRPS_t is

$$\text{CRPS}_t = \frac{1}{|\Omega|}\sum_{\omega\in\Omega}\left|y_{t,\omega}^{\text{fore}} - y_t^{\text{obs}}\right| - \frac{1}{2|\Omega|^2}\sum_{i,j\in\Omega}\left|y_{t,i}^{\text{fore}} - y_{t,j}^{\text{fore}}\right|$$

This accounts for both the deviation from the observed value and the internal dispersion of the predictive sample. Lower values indicate better predictive performance.

Results highlight the superiority of the NH-ARNBP model compared to NH-ARPP, both statistically and predictively:

- PIC: NH-ARNBP achieved significantly higher empirical coverages (85.2% for 99% intervals) compared to only 7.9% for NH-ARPP (Figure 2).

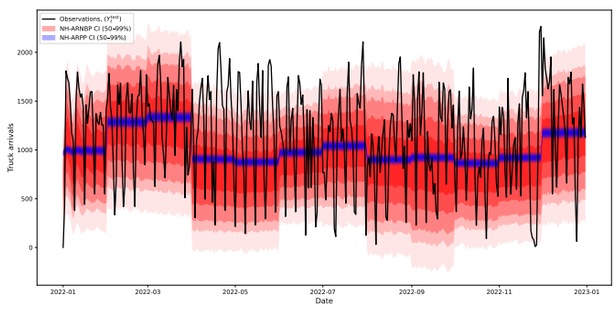


Fig. 2. Daily prediction intervals generated by NH-ARNBP and NH-ARPP for different confidence levels

- LS: NH-ARNBP presented significantly lower average values (8.04 vs. 136.89 for NH-ARPP), indicating a far superior probabilistic fit (Figure 3).
- CRPS: Consistently lower CRPS values indicate superior uncertainty capture and better internal predictive consistency for NH-ARNBP (Figure 4).

IV. Conclusion

This research proposed the NH-ARNBP, a discrete-time forecasting model that combines an autoregressive structure with a non-homogeneous negative binomial process, allowing the generation of accurate trajectories of truck arrivals while capturing autocorrelation, overdispersion, and time-varying behavior. The model is validated as an effective probabilistic

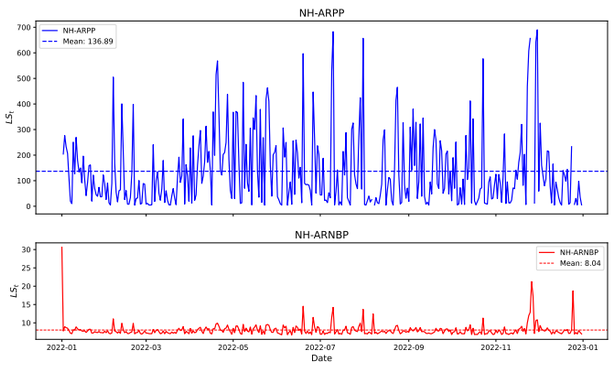


Fig. 3. Daily evolution of the Logarithmic Score for NH-ARNBP and NH-ARPP

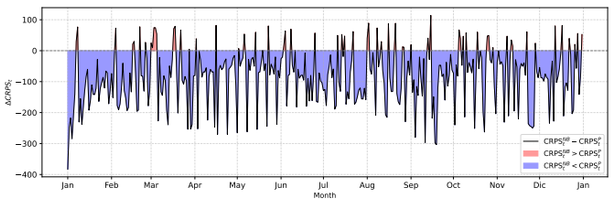


Fig. 4. Daily difference in CRPS performance between NH-ARNBP and NH-ARPP

tool for operational planning and optimization in ports characterized by high variability in truck arrivals. The proposed approach outperforms traditional methods in probabilistic accuracy, coverage reliability, and uncertainty representation. As a result, port authorities and logistic operators can leverage this model for more efficient yard planning, shift scheduling, and environmental impact mitigation. Its adaptability to different time scales and parameter estimation flexibility also makes it suitable for broader applications across the logistics sector.

References

[1] D. R. Cox and P. A. W. Lewis, *The Statistical Analysis of Series of Events*. London: Methuen, 1966.

[2] S. M. Ross, *Introduction to Probability Models*, 10th ed. San Diego, CA: Academic Press, 2010.

[3] R. Ferland, A. Latour, and D. Oraichi, "Integer-valued GARCH process," *J. Time Ser. Anal.*, vol. 27, no. 6, pp. 923–942, 2006.

[4] R. A. Davis and R. Wu, "A negative binomial model for time series of counts," *Biometrika*, vol. 96, no. 3, pp. 735–749, 2009.

[5] C. W. Chen, M. K. So, and J. Li, "Integer-valued GARCH models for time series of counts," *J. Time Ser. Anal.*, vol. 37, no. 2, pp. 224–242, 2016.

[6] C. Gouriéroux and A. Lu, "Count data models with dependent zeros," *J. Econometrics*, vol. 204, no. 2, pp. 179–198, 2018.

[7] U. Bockenholt, "Mixed INAR(1) Poisson regression models: Analyzing heterogeneity and serial dependencies in longitudinal count data," *J. Econometrics*, vol. 89, no. 1–2, pp. 317–338, 1999.

[8] A. C. Cameron and P. K. Trivedi, *Regression Analysis of Count Data*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013.

[9] J. M. Hilbe, *Negative Binomial Regression*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011.

Container Dwell Time Determinants at Multipurpose Maritime Terminals: From Multi-port Analysis to Prediction Enhancement

Sebastián Muñoz-Herrera
Universidad del Desarrollo
Concepción, Chile
semunoz@udd.cl

Karol Suchan
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile
karol.suchan@udp.cl

Rosa González-Ramírez
Universidad de los Andes
Santiago, Chile
rgonzalez@uandes.cl

Abstract*—This study examines the determinants of Container Dwell Time (CDT) across three Chilean multipurpose maritime terminals. While CDT research at specialized container terminals is well-established, knowledge gaps exist regarding multipurpose terminals, hindering creation of accurate CDT estimation models and development of effective management policies for such terminals. Based on three-year import container data, this research studies the impact on CDT of temporal, geographical, operational-logistical, and specialized cargo features. The method combines Cramer's V coefficient and regression analysis to identify key CDT determinants and generate accurate predictions. Results reveal significant differences in CDT determinants across terminals, showing that similar operational characteristics yield different CDT outcomes based on terminal-specific cargo profiles, operational rules, and regional markets. Findings show that accurate CDT estimation requires terminal-specific modelling rather than generic prediction methods. The research contributes to terminal efficiency optimization literature by providing evidence-based insights for tailored CDT management strategies, enhancing resource allocation, improving planning capabilities, and supporting more effective policy development for multipurpose maritime terminals. Additionally, we present preliminary results on the effect of terminal congestion and historical CDT patterns for similar containers, which demonstrate potential for improving prediction accuracy.*

Keywords*—dwell time, container, multipurpose terminal, seaport, multi-port analysis, port congestion, case study, data analytics*

Programación eficiente de personal portuario mediante optimización entera mixta: caso de estudio en Terminal Pacífico Sur (Chile)

Yessica A Mercado Morales
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Andes, Chile
yamercado@miuandes.cl

Hector Lopez Ospina
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Andes, Chile
halopez@uandes.cl

Karol Suchan
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Diego Portales
karol.suchan@mail.udp.cl

Rosa G. González Ramírez
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Ande, Chile
rgonzalez@uandes.cl

***Resumen*—Este trabajo propone un modelo de programación lineal entera mixta para optimizar la planificación semanal de turnos del personal portuario en el Terminal Pacífico Sur (Chile). El modelo considera restricciones operativas reales, la disponibilidad y las habilidades del personal, así como la posibilidad de contratar trabajadores externos. Se emplea un enfoque multiobjetivo que minimiza tanto los costos como la diferencia máxima entre las cargas laborales asignadas a distintos trabajadores utilizando para resolverlo el método de restricciones ε (épsilon). El modelo se compara con la planificación actual correspondiente a dos semanas de operación, y se evalúan diversas políticas operativas. Esto proporciona una herramienta robusta de apoyo a la toma de decisiones para la planificación de personal en terminales portuarios.**

***Palabras clave*—Planificación de turnos, programación entera mixta, optimización laboral, terminal portuario, equidad operativa**

***Abstract*—This work proposes a mixed-integer linear programming model to optimize weekly shift planning for port workers at Terminal Pacífico Sur (Chile). The model considers real operational constraints, worker availability and skills, and the possibility of hiring external personnel. A multi-objective approach is used, minimizing both cost and differences in worker workloads, applying the ε-constraint method. The results of the model are compared with the current planning for two weeks of operation, considering several operational policies. This provides a robust decision-support tool for labor planning in maritime terminals.**

***Keywords*—Port workforce scheduling, mixed-integer programming, labor optimization, shift planning, equity in operations**

Los puertos son centros cruciales para la manipulación, almacenamiento y transferencia de mercancías, conectando diversos modos de transporte y facilitando el comercio internacional. Estas operaciones dependen de una fuerza laboral diversa, incluyendo operadores de grúas, trabajadores portuarios, funcionarios de aduanas y coordinadores de logística. La escasez de personal puede generar cuellos de botella por acumulación de pedidos y aumentar los costos operativos [1]. En contextos como él de Chile, donde el 90 % del comercio exterior se realiza por vía marítima [2], una gestión adecuada del personal portuario es esencial para garantizar operaciones eficientes y altos niveles de productividad.

El puerto de Valparaíso, ubicado en la Región de Valparaíso en Chile, es el puerto con mayor llegada de pasajeros del país y el segundo con mayor movimiento de contenedores. Cuenta con dos terminales principales, cuya operación está a cargo de concesionarias privadas: el Terminal N°1, operado por Terminal Pacífico Sur (TPS), y el Terminal N°2, operado por Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL) hasta marzo 2022 y actualmente por Terminal portuario Valparaíso (TPV) [3]. Este trabajo se centra en modelar los procesos asociados a la planificación y asignación de turnos laborales en TPS, seleccionada por su relevancia en la gestión de importaciones y exportaciones. En sus 24 años de concesión, ha movilizado más de 180 millones de toneladas de carga, consolidándose como un eje estratégico en la transferencia de mercancías, tanto a nivel nacional como internacional [4].

La asignación de turnos laborales en TPS está influenciada por diversos factores, como la coexistencia de múltiples modalidades contractuales: (i) renta fija (contratos de carácter fijo o indefinido, en los que los trabajadores reciben una remuneración fija, establecida en el contrato, sin importar las horas o turnos trabajados); (ii) renta variable (contratos de carácter fijo o indefinido que, a diferencia de los contratos de renta fija, incluyen una parte de la remuneración que depende de la cantidad de turnos realizados); (iii) contratos de provisión de puestos de trabajo — CPPT (trabajadores eventuales con contratos que les garantizan el pago de un mínimo de turnos, con independencia de que efectivamente se realicen); y (iv) eventuales puros (contratados cuando la demanda sobrepasa la fuerza laboral, sin garantía de un mínimo de turnos al mes) [5]. Estas condiciones, junto con exigencias normativas sobre límites legales y descansos, imponen desafíos únicos que requieren un enfoque sistemático para su optimización.

La variabilidad en la demanda de trabajo es uno de los principales desafíos que enfrenta la industria portuaria chilena, lo que complica la estabilidad en la planificación de turnos. Además de afectar la cantidad de trabajadores necesarios por

turno, esta situación genera la necesidad de distribuir de manera justa y eficiente la carga laboral entre los trabajadores, evitando tanto la sobrecarga como la subutilización de los recursos humanos. Lograr este equilibrio no solo es clave para la sostenibilidad operativa, sino también para asegurar condiciones laborales equitativas, mitigar la fatiga del personal y optimizar la utilización de los distintos tipos de contrato disponibles en el sistema portuario.

En TPS, la alta variabilidad de la demanda obliga a planificar los turnos de trabajo diariamente, adaptándolos constantemente a las fluctuaciones operativas. Esta situación requiere una gran flexibilidad en la reasignación del personal. Aunque TPS gestiona un plan semanal a través de su sistema operativo de terminal (TOS), este debe ajustarse cada día para asegurar que haya suficiente personal disponible para cubrir las operaciones. Sin embargo, la dotación propia de TPS es limitada. Por esta razón se complementa la planilla de trabajadores fijos con que se dispone con personal externo proporcionado por Ultraport, que suministra trabajadores tanto eventuales puros como bajo contrato CPPT. Esta dependencia del personal externo refuerza la necesidad de una planificación eficiente, que no solo garantice la continuidad operativa, sino que también contribuya a una mejor distribución de la carga laboral y a la mejora de las condiciones laborales de los trabajadores portuarios.

En este trabajo, se propone un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para asignar turnos semanales a trabajadores portuarios, considerando restricciones operativas reales y la posibilidad de asignar trabajadores externos cuando la dotación interna es insuficiente. Se plantea como un modelo multiobjetivo, donde el primer objetivo minimiza los costos asociados a la asignación de personal interno y a la contratación de personal externo, y el segundo minimiza la diferencia máxima entre las cantidades de turnos asignados a distintos trabajadores. Para abordar el carácter multiobjetivo del problema, se implementa el método de restricciones ε (*epsilon-constraint method*), privilegiando la minimización de costos y tratando la equidad como una restricción adicional. Esta técnica, ampliamente usada en la literatura [6]-[8], permite explorar compromisos entre eficiencia operativa y justicia laboral sin recurrir a ponderaciones arbitrarias.

El modelo considera el siguiente conjunto de variables y restricciones principales: los turnos J, las tareas K, los días del horizonte semanal L, y los bloques horarios B definidos como: "mañana, tarde, noche". Para cada par turno-tarea (j, k), la terminal establece una demanda D_{jk} de trabajadores. Cada trabajador $i \in I$ se describe según sus habilidades γ_{ik} (si puede realizar la tarea k) y su disponibilidad A_{ij} en cada turno (si está disponible en el turno j). La variable de decisión X_{ijk} indica si el trabajador i se asigna a la tarea k en el turno j, sujeto a que esté capacitado y disponible. Además, la asignación debe cumplir con restricciones normativas, como límites de jornada y descansos. Se permite recurrir a trabajadores externos NE_{jk} si la dotación interna es insuficiente. El modelo se implementa en el lenguaje de programación Python y se resuelve mediante el solver Gurobi. Se apoya en instancias realistas utilizando datos de dos semanas de operación proporcionados por TPS, lo que permite comparar directamente los resultados del modelo con la planificación real del terminal.

Se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar cómo diferentes políticas operacionales afectan las decisiones de asignación y el valor de la función objetivo. Entre los escenarios considerados, se incluyen:

- Variación en la demanda por turno y tarea (para simular distintos tamaños de terminales).
- Diferentes niveles de polifuncionalidad de personal (γ_{ik}).
- Restricciones reglamentarias sobre turnos consecutivos y descansos.
- Limitaciones del uso de trabajadores externos.
- Diferentes niveles de disponibilidad de personal (A_{ij}).

Este estudio proporciona una base sólida para el desarrollo de modelos de planificación de personal en contextos portuarios, optimizando los recursos disponibles, promoviendo la equidad entre los trabajadores y asegurando el cumplimiento de las normativas vigentes. Los hallazgos del modelo pueden orientar futuras estrategias de planificación más adaptables, equitativas y sostenibles para las terminales portuarias. Si bien este estudio se enfoca en TPS, el modelo también puede adaptarse a otras terminales portuarias o sectores intensivos en mano de obra que presenten características similares, ofreciendo una herramienta robusta para enfrentar desafíos de planificación bajo restricciones operativas complejas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el valioso apoyo de los estudiantes de pregrado de la Universidad de los Andes, Ignacio Cifuentes y Gonzalo Carrasco, por su colaboración en la implementación computacional del modelo. Asimismo, se agradece a Terminal Pacífico Sur (TPS) por su apoyo al desarrollo de esta investigación y al Fondo FAI de la Universidad de los Andes por el financiamiento otorgado para la presentación de este trabajo en el congreso.

REFERENCES

[1] A. Moros-Daza y M. Jubiz-Diaz, "Labour force management in maritime ports: A comprehensive systematic literature review," *Heliyon*, vol. 10, no. 11, e31401, 2024.

[2] Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTMAR), *Boletín Estadístico Portuario*, Ed. 2024.

[3] Cámara Marítima y Portuaria de Chile (CAMPORT), *Reporte Estado de Concesiones Portuarias*, abril 2025.

[4] TPS Valparaíso. *Reporte integrado 2024,* marzo 2025.

[5] Cámara Marítima y Portuaria de Chile (CAMPORT), *Radiografía del Sistema Laboral Portuario Chileno*, noviembre 2023

[6] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ε-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems," *Appl. Math. Comput.*, vol. 213, pp. 455–465, 2009.

[7] M. Mesquita, J. Rui, y A. Barbosa, "New ε-constraint methods for multi-objective integer linear programming: A Pareto front representation approach," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 306, pp. 286–307, 2023.

[8] M. Ehrgott y S. Ruzika, "Improved ε-Constraint Method for Multiobjective Programming," *J. Optim. Theory Appl.*, vol. 139, pp. 375–396, 2008

Port Call Learning and Optimization Challenges in the Netherlands: The PortCall.Zero Project

1st Frederik Schulte
Martitime and Transport Technology
Delft University of Technology
Delft, The Netherlands
f.schulte@tudelft.nl

***Abstract*— European seaports must achieve net zero emission by 2050 and 55% emission reduction ('fit for 55') by 2030 as agreed in the European Green Deal and comply with the FuelEU Maritime and EU Emissions Trading System regulations. Ports are complex ecosystems of mutually interacting organizations. A single logistic operation within the port call process of visiting ships may involve 30 parties and 200 interactions. Up to 80% of the emissions in ports are attributed to the port call process. Efforts of a single actor to reduce emissions are often suboptimal, or may even be counterproductive. Moreover, the anticipated sharp surge in demand for electricity and renewable fuels introduces new uncertainties. This poses an urgent need for new methods to support coordinated decision-making and actions to develop collective net-zero strategies for the port call. Current methods lack integrated planning capabilities, are often limited by data sharing, and do not sufficiently account for uncertainties introduced by shore power and new fuels. This project develops novel new (federated) machine learning and optimization methods that capture the complexity of the port-call process and handle uncertainties caused by the energy transitions. The approach is demonstrated in the ports of Rotterdam and Moerdijk.**

Session N°3 – Track N°3

Efficiency and Performance

Chair: Pérez-Rojas, K. *(Universidad de Talca)*
Place: G6-056
Time: 15:40 – 16:55

Efficiency Assessment of Latin American Multipurpose Port Terminals: An Application of the Slacks-Based Measure (SBM) Model

Time: 15:40 – 15:55
Authors:

- Agüero-Tobar, M. *(Universidad de Talca)*
- González-Araya, M. *(Universidad de Talca)*
- González-Ramírez, R. *(Universidad de los Andes)*

Evaluación del Impacto de la Sustentabilidad Social en la Eficiencia Educacional de las Ciudades Chilenas

Time: 16:00 – 16:15
Authors:

- Pérez-Rojas, K. *(Universidad de Talca)*
- Angulo-Meza, L. *(Universidade Federal Fluminense)*
- González-Araya, M. *(Universidad de Talca)*

HP-Based Evaluative Model for Assessing the Performance of Research and Technological Centers at the University of Talca

Time: 16:20 – 16:35
Authors:

- Saavedra, V. *(Universidad de Talca)*
- Quintero-Reyes, J. *(Universidad de Talca)*
- Pérez-Rojas, K. *(Universidad de Talca)*
- Varas-Concha, F. *(Universidad de Talca)*

Applying DEA Techniques to Analyze the Efficiency of Uruguayan SMEs

Time: 16:40 – 16:55
Authors:

- Quintana, P. *(Universidad de la República)*
- Cancela, H. *(Universidad de la República)*

Efficiency Assessment of Latin American Multipurpose Port Terminals: An Application of the Slacks-Based Measure (SBM) Model

Magdiel Agüero Tobar
PhD Program in Engineering Systems
Universidad de Talca
Curico, Chile
magdiel.aguero@utalca.cl

Marcela González Araya
Department of Industrial Engineering
Universidad de Talca
Curico, Chile
mgonzalez@utalca.cl

Rosa Gonzalez Ramirez*)*
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Santiago, Chile
Universidad de los Andes
rgonzalez@uandes.cl

***Abstract*— This study evaluates the operational efficiency of Latin American multipurpose port terminals using the non-oriented Slacks-Based Measure (SBM) model. A total of 29 terminals across the Atlantic and Pacific coasts were analyzed, considering key operational inputs such as quay length, number of dock cranes, maximum draft, and number of berths, with container throughput as the output. The results reveal significant disparities in efficiency, with 27.6% of terminals achieving full efficiency. Furthermore, Atlantic terminals outperformed Pacific ones, reflecting regional infrastructure and governance differences. The findings provide actionable insights for policymakers and port operators aiming to optimize resource allocation and enhance regional competitiveness.**

Keywords—Port efficiency, DEA, SBM

I. INTRODUCTION

Global maritime trade has grown steadily, with containerized cargo increasing by 23% between 2015 and 2021, surpassing 840 million TEUs [1]. Maritime transport dominates global trade, handling over 80% of total volume [2]. Latin American ports, including Brazil, Colombia, Chile, Peru, Argentina, Ecuador, Uruguay, and Venezuela, managed 3.5% of global container traffic in 2021 [1]. playing a key role in trade and regional development [4] [5].

However, rising cargo volumes and limited infrastructure create operational challenges like accommodating larger vessels and reducing turnaround times [3] [6]. Improving port efficiency is essential for competitiveness and service quality [7] [15]. Among the available methodologies, DEA stands out for its flexibility in handling multiple inputs and outputs [8], though traditional models like CCR and BCC do not capture input and output slacks [9]. To address this, the Slacks-Based Measure (SBM) model by [10] offers a more precise efficiency assessment. Considering the complexity of port operations and the prevalence of multipurpose terminals in the region [5], this study applies the SBM-DEA model to evaluate efficiency and propose improvements for Latin American ports.

II. LITERATURE REVIEW

Port efficiency has been widely studied due to its relevance in global trade and supply chain performance. Various methodologies have been applied, including Total Factor Productivity [16], regression models [17], simulations [18], and queue theory [19]. Among these, Data Envelopment Analysis (DEA) stands out for its flexibility in handling multiple inputs and outputs without requiring a specific functional form [8].

However, most DEA-based studies have focused on container terminals using classical radial models like CCR and BCC, which fail to capture input and output slacks [9]. To address this, the Slacks-Based Measure (SBM) model, introduced by [10], offers a more detailed assessment by incorporating slacks. Despite its advantages, SBM applications in port studies—especially for multipurpose terminals—remain scarce [13] [14] even though such terminals account for 33.9% of Latin America's total [5]

Additionally, few studies include financial variables or distinguish between port operational interfaces [11]; [12]. This study addresses these gaps by applying the SBM model to Latin American multipurpose terminals, focusing on key operational dimensions and interface-specific efficiency.

III. MATERIALS AND METHODS

This study evaluates the efficiency of 29 multipurpose port terminals located along the Atlantic and Pacific coasts of Latin America using the Slacks-Based Measure (SBM) model of Data Envelopment Analysis (DEA). The SBM model, introduced by [10] is a non-radial and non-oriented approach that explicitly accounts for input excesses and output shortfalls, providing a

more accurate identification of inefficiencies compared to traditional radial DEA models.

The analysis considers four input variables: quay length (meters), number of equivalent dock cranes, maximum quay draft (meters), and number of berths. The single output variable is the total container throughput measured in TEUs for the year 2022. This input-output structure reflects key operational dimensions relevant for port performance. While the BCC model assesses efficiency under the assumption of variable returns to scale and focuses on output maximization, the SBM model captures both radial and non-radial inefficiencies simultaneously. The dual-model approach allows for a comprehensive evaluation of port terminal performance, highlighting both scale-related and slack-related inefficiencies. This methodological framework supports the study's objective of providing detailed diagnostic insights for operational improvements in Latin American multipurpose port terminals. Tables 1 and 2 present the decision variables and the mathematical formulation of the Non-Oriented SBM model

Table 1. Decision variables used in SBM model

Decision variable	Definition
$\boldsymbol{\lambda_j}$	Intensity variable for the combination of DMUs.
$\boldsymbol{s_r^+}$	Output slacks (deficient outputs).
$\boldsymbol{s_i^-}$	Input slacks (excess inputs).

Table 2. Mathematical formulation of SBM non-oriented model

$$Minimize\ \rho = \frac{1 - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{io}}}{1 + \frac{1}{s}\left(\sum_{r=1}^{s_1}\frac{s_r^+}{y_{ro}}\right)} \quad (1)$$

Subject to

$$x_{io} = \sum_{j=1}^{n}\lambda_j\, x_{ij}\ + s_i^-\ \ \forall_i \quad (2)$$

$$y_{ro} \sum_{j=1}^{n}\lambda_j\, y_{rj} - s_r^+\ \ \forall_r \quad (3)$$

$$s_r^+ \geq 0 \quad r = 1, \dots, s \quad (4)$$

$$s_i^- \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$\lambda_j\ \geq 0 \quad (6)$$

IV. RESULTS

In this study, the efficiency of port terminals will be evaluated using four key inputs and a single output. The analysis considers four inputs: Quay Length (m), indicating berthing capacity; Number of Equivalent Dock Cranes, reflecting cargo handling capability; Maximum Draft (m), determining the port's ability to receive larger vessels; and Number of Berths, representing available docking spaces. The single output is the TEUs Transferred in 2022, measuring overall cargo handling performance. The ports considered in the analysis, which vary in terms of size and operational capacity, are presented in Table 3. The study includes six ports from Argentina, six from Brazil, nine from Chile, three from Colombia, three from Ecuador, and two from Peru. This diverse selection of ports provides a broad basis for benchmarking performance across different regional and operational contexts, enhancing the robustness of the efficiency comparisons. Table 4 presents the statistics of the data used in this study,

The application of the Slacks-Based Measure (SBM) model revealed significant heterogeneity in the efficiency levels among the 29 evaluated multipurpose port terminals across Latin America. Table 4 presents the efficiency scores of SBM model. Out of the total, only 8 ports (27.6%) achieved full efficiency with a score of 1.00. These efficient terminals include Santos, Itapoá, and Portonave in Brazil; Cartagena in Colombia; Mar del Plata and Bahía Blanca in Argentina; and Iquique and Coquimbo in Chile.

Table 3. Distribution of Ports by Ocean

Ocean	Country	Ports Terminals
Atlantic	Argentina	Buenos Aires, Ushuaia
	Brazil	Itapoá, Santos, Porto Nave
	Colombia	Cartagena, Guajira
Pacific	Chile	Arica, Coquimbo, Valparaíso, San Antonio, Talcahuano-San Vicente, Chacabuco
	Perú	El Callao, Matarani
	Ecuador	Guayaquil, Manta, Posorja
	Colombia	Buenaventura

At the regional level, Atlantic ports demonstrated a superior average efficiency score (0.63) compared to Pacific ports (0.353), suggesting a performance gap that reflects underlying differences in infrastructure investment, operational management, and regulatory frameworks. The country-level analysis indicated that Brazil had the highest average efficiency (0.80), followed by Colombia (0.52), Argentina (0.51), Chile (0.45), Ecuador (0.18), and Peru (0.07).

The analysis also revealed that ports located on the Pacific coast, such as Guajira (0.002), Manta (0.005), and Matarani (0.011), recorded the lowest efficiency scores, signaling critical operational deficiencies. The results underscore the need for targeted strategies to improve resource utilization and cargo handling capacities, particularly in Pacific terminals.

Table 4. Statistics of data from 2022 used

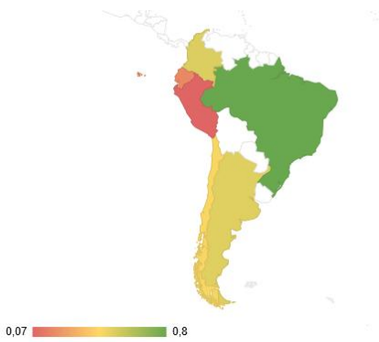
	Inputs				**Output**
	Quay length (m)	Number of Equivalent Dock Cranes	Maximum Draft (m)	Number of berths	TEUs
Average	1015	7	13	6	718659
Standard deviation	874	7	2	4	1084955
Maximum	3900	32	19	17	5000000
Minimum	240	1	9	2	2200

Table 5. Efficiency Scores of Ports Based on SBM Non-Oriented Model.

Country	DMU	SCORE SBM MODEL
ARGENTINA	TERMINAL ZARATE	0,275
	TERMINAL PORTUARIO ROSARIO	0,548
	MAR DEL PLATA	1,000
	BAHIA BLANCA	1,000
	GRAN BUENOS AIRES	0,221
	USHUAIA	0,045
BRAZIL	PUERTO ITAJAI	0,630
	TECON RIO GRANDE	0,632
	PARANAGUA	0,512
	ITAPOÁ	1,000
	SANTOS	1,000
	PORTONAVE	1,000
CHILE	IQUIQUE	1,000
	MEJILLONES-ANGAMOS	0,345
	ANTOFAGASTA	0,464
	ARICA	0,118
	COQUIMBO	1,000
	VALPARAISO	0,278
	SAN ANTONIO	0,615
	TALCAHUANO- SAN VICENTE	0,188
	CHACABUCO	0,042
COLOMBIA	CARTAGENA	1,000
	BUENAVENTURA	0,570
	GUAJIRA	0,002
ECUADOR	GUAYAQUIL	0,437
	MANTA	0,005
	POSORJA	0,087
PERÚ	PUERTO EL CALLAO	0,134
	MATARANI	0,011

Additionally, the study identified improvement targets for each inefficient terminal. These targets include specific reductions in input excesses (such as berth length or number of cranes) and required increases in outputs (TEUs transferred) necessary for each port to reach the efficiency frontier. The results serve as a valuable tool for policymakers and port managers seeking to enhance operational efficiency and competitiveness.

Fig 1. Average efficiency map



V. Discussion

The efficiency analysis of Latin American multipurpose port terminals using the SBM model reveals significant disparities both between countries and between Atlantic and Pacific coasts. Atlantic ports exhibit higher average efficiency levels, mainly due to greater infrastructure investment, better equipment utilization, and more advanced governance models. Notably, Brazilian ports such as Santos, Itapoá, and Portonave stand out for their positive performance, driven by recent modernization efforts and public-private partnerships. Additionally, Colombia's Cartagena shows high efficiency linked to operational management and improved connectivity.

In contrast, several Pacific ports, including Guajira, Manta, and Matarani, demonstrate critical inefficiencies associated with infrastructure deficits, outdated equipment, and governance challenges like fragmented regulatory frameworks. The findings highlight the role of scale and operational management in explaining efficiency gaps. Ports with high infrastructure but low cargo throughput exhibit clear signs of resource underutilization, while smaller ports with better input-output balance perform relatively well. The study suggests that addressing investment gaps, improving governance structures, and implementing targeted operational strategies are key priorities to enhance port efficiency, especially in Pacific terminals.

VI. Conclusions

This study assessed the operational efficiency of 29 Latin American multipurpose port terminals using the Slacks-Based Measure (SBM) model. The results reveal considerable efficiency disparities, with only 27.6% of terminals achieving full efficiency. Atlantic ports, especially in Brazil, outperformed Pacific terminals, reflecting differences in infrastructure investment, management practices, and governance structures. The SBM model proved effective in identifying inefficiencies related to both input excesses and output shortfalls, offering a more detailed diagnosis than traditional DEA models. Despite the study's contributions, limitations remain, such as the exclusive focus on container throughput and the omission of financial or environmental variables. Future research should address these aspects and incorporate longitudinal data to analyze efficiency trends over time.

Acknowledgment *(Heading 5)*

Magdiel Agüero is grateful for the research funding provided by ANID-Subdirección de Capital Humano/Doctorado Nacional/2023/21230946.

References

[1] World Bank, "Container port traffic (TEU: 20 foot equivalent units)," 2024. [Online]. Available: https://datos.bancomundial.org/indicador/IS.SHP.GOOD.TU

[2] UNCTAD, Review of Maritime Transport 2020: Shipping in Times of the COVID-19 Pandemic, New York, USA: United Nations Publications, 2020.

[3] UNCTAD, Informe sobre el transporte marítimo 2023 (Panorama general), United Nations Conference on Trade and Development, 2023.

[4] T. Serebrisky, J. M. Sarriera, A. Suarez-Aleman, G. Araya, C. Briceno-Garmendia, and J. Schwartz, "Exploring the drivers of port efficiency in Latin America and the Caribbean," Transport Policy, vol. 45, pp. 31–45, 2016.

[5] ECLAC, “Conexiones de carga marítima entre Asia y el Pacífico y América Latina: análisis de fletes de transporte, sus determinantes y restricciones,” United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean (CEPAL), 2021.

[6] CAMPORT, Una nueva vuelta de tuerca - Planificar y coordinar para la productividad, Santiago de Chile: Cámara Marítima y Portuaria de Chile, 2017.

[7] T. M. Phan, V. V. Thai, and T. P. Vu, “Port service quality (PSQ) and customer satisfaction: An exploratory study of container ports in Vietnam,” Maritime Business Review, vol. 6, no. 1, pp. 72–94, 2021.

[8] K. Cullinane, D. W. Song, and T. Wang, “The application of mathematical programming approaches to estimating container port production efficiency,” Journal of Productivity Analysis, vol. 24, no. 1, pp. 73–92, 2006.

[9] T. F. Wang and K. Cullinane, “The efficiency of European container terminals and implications for supply chain management,” Maritime Economics and Logistics, vol. 8, no. 1, pp. 82–99, 2006.

[10] K. Tone, “A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis,” European Journal of Operational Research, vol. 130, no. 3, pp. 498–509, 2001.

[11] C. Bierwirth and F. Meisel, “A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals,” European Journal of Operational Research, vol. 202, no. 3, pp. 615–627, 2010.

[12] K. G. Murty et al., “Hongkong international terminals gains elastic capacity using a data-intensive decision-support system,” Interfaces, vol. 35, no. 1, pp. 61–75, 2005.

[13] S. Güner, “Investigating infrastructure, superstructure, operating and financial efficiency in the management of Turkish seaports using data envelopment analysis,” Transport Policy, vol. 40, pp. 36–48, 2015.

[14] G.-Y. Gan, H.-S. Lee, Y.-J. Tao, and C.-S. Tu, “Selecting suitable, green port crane equipment for international commercial ports,” Sustainability, vol. 13, no. 12, p. 6801, 2021.

[15] H. Schøyen, C. T. Bjorbæk, K. Steger-Jensen, N. Bouhmala, U. Burki, T. E. Jensen, and Ø. Berg, “Measuring the contribution of logistics service delivery performance outcomes and deep-sea container liner connectivity on port efficiency,” *Research in Transportation Business & Management*, vol. 28, pp. 66–76, 2018.

[16] M. Kim and A. Sachish, “The Structure of Production, Technical Change and Productivity in a Port,” *The Journal of Industrial Economics*, vol. 35, no. 2, pp. 209–223, 1986.

[17] R. M. Tahar and K. Hussain, “Simulation and analysis for the Kelang Container Terminal operations,” *Logistics Information Management*, vol. 13, no. 1, pp. 14–20, 2000
.
[18] M. P. Fanti, G. Iacobellis, W. Ukovich, V. Boschian, G. Georgoulas, and C. Stylios, “A simulation-based Decision Support System for logistics management,” *Journal of Computational Science*, vol. 10, pp. 86–96, 2015.

[19] B. Dragovic and N. Dj. Zrnic, “A Queuing Model Study of Port Performance Evolution,” *Analele Universitatii “Eftimie Murgu” Resita Fascicola de Inginerie*, vol. 2, pp. 257–264, 2011.

Evaluación del impacto de la sustentabilidad social en la eficiencia educacional de las ciudades chilenas

Karen Pérez-Rojas
Programa de Doctorado en Sistemas de Ingeniería
Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca
Curicó, Chile
kperez@utalca.cl

Lidia Angulo Meza
Production Engineering Department
Universidade Federal Fluminense
Niteroi, Brazil
lidiaangulomeza@id.uff.br

Marcela González-Araya
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca
Curicó, Chile
mgonzalez@utalca.cl

***Abstract*— La eficiencia en el uso de recursos educativos es clave para el desarrollo social y económico de los territorios; no obstante, su relación con la sustentabilidad social permanece poco explorada. Este estudio estima la eficiencia educativa de las principales ciudades de Chile mediante modelos de Análisis Envolvente de Datos (DEA) y evalúa, a través de regresión fraccional, cómo distintos componentes de la sustentabilidad social explican las brechas observadas. Los resultados indican una eficiencia promedio de 0,47 y una marcada heterogeneidad territorial. En promedio, la pobreza multidimensional y la densidad de organizaciones se asocian con menores niveles de eficiencia. El análisis por tramos revela que, en ciudades con ineficiencia moderada, cobra relevancia la complementariedad con el área de la salud, mientras que en contextos de ineficiencia severa el hacinamiento crítico emerge como el principal determinante. Estos hallazgos sugieren políticas diferenciadas: reducir brechas de equidad e infraestructura en comunas rezagadas; fortalecer la articulación educación–salud en escenarios de ineficiencia moderada; y priorizar la mitigación del hacinamiento y mejoras en bienestar y seguridad donde predomina la ineficiencia severa.**

Keywords—Análisis envolvente de datos, Eficiencia educativa, Sustentabilidad social, Políticas territoriales

AHP-Based evaluative model for assessing the performance of research and technological centers at the University of Talca

Valentina Saavedra
Centro Tecnológico Kipus
Universidad de Talca
Curicó, Chile
valentina.saavedra@utalca.cl

Juan Quintero-Reyes
Escuela de Ingeniería Civil Industrial
Universidad de Talca
Curicó, Chile
jquintero17@alumnos.utalca.cl

Karen Pérez-Rojas
Programa de Doctorado en Sistemas de Ingeniería
Universidad de Talca
Curicó, Chile
kperez@utalca.cl

Felipe Varas-Concha
Deparmento de Ingeniería Industrial
Universidad de Talca
Curicó, Chile
fvaras@utalca.cl

***Abstract*— This study presents the development of an evaluative model designed to assess the performance of the research and technological centers—diverse institutional units engaged in research, innovation, education, artistic creation, outreach, and service delivery—at the University of Talca. Due to their heterogeneity and mission-specific goals, a standardized assessment approach proved inadequate. To address this, a tailored indicator management system was implemented, employing the Analytic Hierarchy Process (AHP) as its core methodology. This enabled the prioritization of six strategic dimensions: research, innovation, artistic creation, education, service delivery, and dissemination/alliances.**

The model integrates quantitative indicators within a hierarchical framework, reflecting the specific activities and strategic relevance of each center. Data collected from 23 centers were used to assign relative weights to the six dimensions. A clustering analysis revealed seven distinct profiles emphasizing different mission areas. This classification captures the centers' heterogeneity and supports a more nuanced, transparent, and aligned performance evaluation, providing a replicable framework for complex academic institutions.

Keywords*— *Performance indicators, Analytic Hierarchy Process (AHP), university centers, multidimensional evaluation, strategic management, clustering.

I. INTRODUCTION

Evaluating research and technological centers within universities is complex due to their diverse missions and organizational heterogeneity [1]. Universities have evolved into intricate ecosystems where teaching, research, innovation, and community engagement intersect [2]. This multidimensionality challenges traditional, single-metric evaluation methods, risking inadequate insights and misallocated resources [3].

The University of Talca illustrates such complexity. As a multi-campus public institution, it operates numerous specialized centers spanning diverse fields such as bioinformatics, agroclimatology, energy, and social sciences [2]. This diversity introduces significant variability in expectations and performance standards. To manage these differences, the university employs six strategic dimensions—research, innovation, artistic creation, education, service delivery, and alliances/dissemination—to guide evaluation in a multi-dimensional framework [4]. However, challenges arise because centers vary in how much they emphasize different dimensions [5] and aggregating diverse indicators into coherent performance measures requires robust methodology. To address this, the study proposes an evaluation model using the Analytic Hierarchy Process (AHP), integrating qualitative and quantitative assessments [6]. This model seeks to provide nuanced insight into center performance, support institutional decision-making, and align resources with strategic goals

This paper presents the development, implementation, and assessment of this evaluative model, offering insights for other institutions facing similar governance and evaluation needs.

II. STRATEGIC DIMENSIONS: LITERATURE REVIEW

The model is structured around six strategic dimensions: research, innovation, artistic creation, education, service delivery, and dissemination/alliances. These were chosen to reflect the broad contributions expected from university-affiliated centers. The use of this structure is consistent with approaches taken by other institutions worldwide.

A. Research

Research performance is a cornerstone of academic evaluation. Key indicators include the volume and quality of publications, citation impact, and competitive research funding. Studies show strong correlations between citation-based metrics and peer review results, suggesting their validity for evaluation [7]. Research projects and internships signify knowledge creation, collaboration, and institutional visibility [8].

B. Innovation

Innovation reflects a center's capacity to translate knowledge into practical, societal, and economic benefits. Indicators include national and international R&D&I projects [9], intellectual property outputs like patent applications and registrations [10], and other proprietary assets.

C. Artistic Creations

Artistic creation is significant, especially in universities with art and design faculties. Creative projects—including

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©2025 IEEE

performances and exhibitions—extend educational missions and promote cultural engagement [11]. Metrics such as the number of creative outputs and related funding reveal artistic innovation and interdisciplinary collaboration [12]. Additionally, registered works under copyright, including books and multimedia productions, signify scholarly artistry and legal recognition [13].

D. Education and Training

Education is central to university missions. Indicators such as undergraduate and postgraduate thesis supervision reflect centers' contributions to human capital development [14]. Continuing education programs—including certifications, diplomas, workshops, and seminars—bridge academic knowledge and societal needs, promoting lifelong learning and external engagement [11]. Such programs enable centers to diversify their impact and engage with broader communities.

E. Services

Service delivery demonstrates how centers apply expertise in practical contexts. Metrics include the number and diversity of services offered, revenue generated, and accreditations or certifications that ensure quality and compliance [15] Service activities reinforce institutional relevance and sustainability.

F. Outreach, Extension, and Alliances

Outreach and alliances are crucial for societal integration. Organizing events like conferences and exhibitions underscores public engagement [16]. Participation of experts in external events and policy forums reflects institutional involvement in societal discourse [17]. Institutional representation through media presence and policy contributions enhances influence and visibility.

III. Methodology

This study applied the Analytic Hierarchy Process (AHP) [6] to determine the relative importance of the six strategic dimensions—research, innovation, artistic creation, education, service delivery, and outreach/alliances—in the evaluation of research and technological centers at the University of Talca.

The evaluation model was structured as a hierarchical framework with the overall performance objective at the top, followed by institutional dimensions, thematic areas, and specific quantitative indicators (see Fig. 1).

To capture expert judgment, a structured questionnaire was developed using only pairwise comparison questions formulated with Saaty's fundamental 1–9 scale. The questionnaire was administered to the directors of 23 active centers, each of whom evaluated the relative importance of the six strategic dimensions in the context of their center's mission and activities.

For each center, a pairwise comparison matrix was constructed based on the director's responses. The weight vector corresponding to the relative priorities of the six dimensions was calculated by extracting the normalized principal eigenvector of the matrix. The internal consistency of each matrix was verified using the Consistency Ratio (CR), and only matrices with CR values below the threshold of 0.10 were considered valid [18].

To complement the AHP-based weighting process, a hierarchical cluster analysis was performed in Minitab 19 using, as input variables, the relative weights assigned to the six strategic dimensions—obtained individually for each center through the AHP procedure. The analysis applied Euclidean distance and complete linkage to group centers with similar strategic profiles. Based on the resulting dendrogram and cluster cohesion, a seven-cluster solution was selected. Each cluster's centroid was calculated to characterize its average prioritization pattern, and inter-cluster distances were used to assess differentiation. This procedure enabled the identification of center typologies based on shared strategic emphases.

IV. Results

The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied individually to each center, resulting in a set of relative weights across the six strategic dimensions. By computing a simple average of these weights across all centers, general trends in institutional prioritization emerged. The highest average weight was assigned to the research dimension (23.9%), followed closely by education and training (22.9%) and outreach and alliances (19.6%), reflecting a shared emphasis on knowledge generation, academic development, and external engagement. Service delivery (13.2%) and innovation (13.0%) were assigned moderate importance, while artistic creation (7.3%) received the lowest average weight across the evaluated centers.

Building on the AHP results, a hierarchical cluster analysis grouped the 23 centers into seven clusters according to their strategic weighting profiles. These clusters revealed diverse patterns of emphasis: some centers prioritized research and education, while others focused more on outreach, service provision, or innovation. The centroid values for each cluster captured these differences, reflecting the heterogeneity of the centers' missions. This classification enables a more nuanced and contextualized approach to performance evaluation and institutional planning.

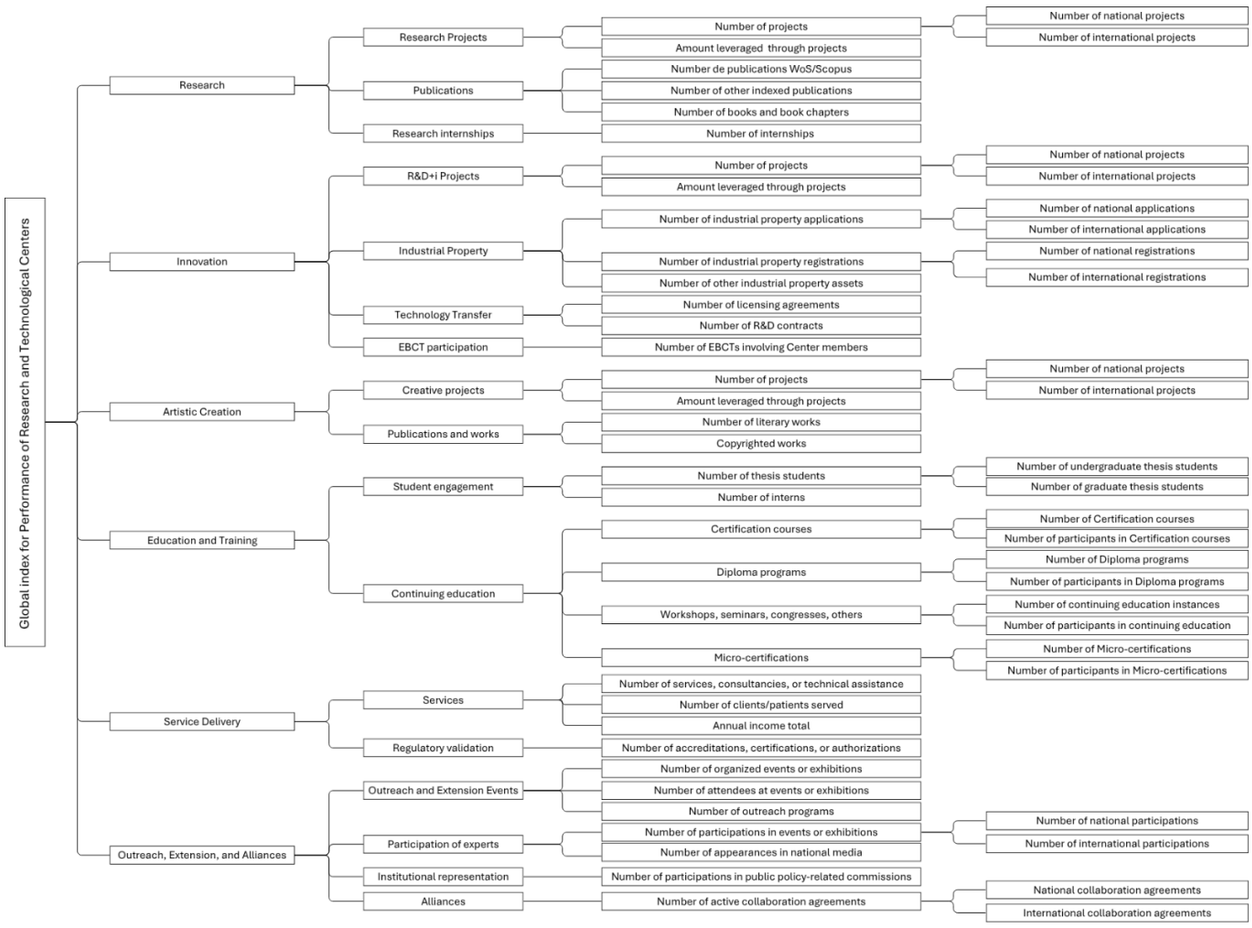


Fig. 1. Hierarchical structure of the evaluative model for research and technological centers at the University of Talca

REFERENCES

[1] B. Cantwell, "Considerations for evaluating academic units in complex universities and university systems: A capabilities-based approach," *International Journal of Chinese Education*, vol. 8, no. 1, pp. 43–59, 2019.

[2] M. Cervantes, G. Ajmone, W. Polt, S. Wooding, and N. Vonortas, "Chilean Public Research Institutes and the Knowledge Triangle," Jun. 2015. Accessed: Jun. 09, 2025. [Online].

[3] D. Manheim, "Building less-flawed metrics: Understanding and creating better measurement and incentive systems," Oct. 13, 2023, *Cell Press*.

[4] M. Bianco, N. Gras, and J. Sutz, "Academic Evaluation: Universal Instrument? Tool for Development?" *Minerva*, vol. 54, no. 4, pp. 399–421, Dec. 2016.

[5] K. Barbakadze, "The role of innovative technologies in improvement of service delivery," Mar. 2019. [Online].

[6] T. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation," *McGraw-Hill*, vol. 1, 1980.

[7] D. Pride and P. Knoth, "Peer Review and Citation Data in Predicting University Rankings, a Large-Scale Analysis," 2018, pp. 195–207.

[8] B. Lepori *et al.*, "Comparing the evolution of national research policies: what patterns of change?" *Sci Public Policy*, vol. 34, no. 6, pp. 372–388, Jul. 2007.

[9] G. Abramo, C. A. D'Angelo, and F. Di Costa, "University-industry research collaboration: A model to assess university capability," *High Educ (Dordr)*, vol. 62, no. 2, pp. 163–181, Aug. 2011.

[10] G. M. Man, D. Zamfir, D. Diaconescu, A.-V. Radu, F. Aldea, and G. Ionescu, "The Role of Digital Technologies and Intellectual Property Management in Driving Sustainable Innovation," *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 3135, Apr. 2025.

[11] M. Samaniego, N. Usca, J. Salguero, and W. Quevedo, "Creative Thinking in Art and Design Education: A Systematic Review," *Educ Sci (Basel)*, vol. 14, no. 2, p. 192, Feb. 2024.

[12] G. Grau Pérez, "Cultural and creative networks as enabling contexts for artistic research," *European Journal of Cultural Management and Policy*, vol. 14, Jan. 2025.

[13] T. Lundén and K. Sundén, "Art as academic output: quality assessment and Open Access publishing of artistic works at the University of Gothenburg," *Art Libraries Journal*, vol. 40, no. 4, pp. 26–32, Jun. 2015.

[14] H. Wu, S. Bai, Y. Liao, and C. Tan, "The Academic Performance and Upward Mobility of Students in Education Program," *Journal of World Englishes and Educational Practices*, vol. 6, no. 1, pp. 137–166, Jan. 2024.

[15] S. Kuhlmann and A. Rip, "Next-Generation Innovation Policy and Grand Challenges," *Sci Public Policy*, vol. 45, no. 4, pp. 448–454, Aug. 2018.

[16] L. Bornmann, "What is societal impact of research and how can it be assessed? a literature survey," Feb. 2013.

[17] M. Perkmann *et al.*, "Academic engagement and commercialisation: A review of the literature on university–industry relations," *Res Policy*, vol. 42, no. 2, pp. 423–442, Mar. 2013.

[18] N. Subramanian and R. Ramanathan, "A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management," *Int J Prod Econ*, vol. 138, no. 2, pp. 215–241, Aug. 2012.

Applying DEA techniques to analyze the efficiency of Uruguayan SMEs

Patricia Quintana
Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial
& Instituto de Computación
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
pquintan@fing.edu.uy

Héctor Cancela
Instituto de Computación
Universidad de la República
Montevideo, Uruguay
cancela@fing.edu.uy

***Abstract*—This study applies a Malmquist-DEA analysis to evaluate productivity dynamics in 119 Uruguayan SMEs during the 2020-2022 period. The results reveal that, while the technological frontier showed significant advances, three distinct patterns of business adaptation were identified: (1) 37% of companies that combined improvements in operational efficiency with effective productivity gains; (2) 20% that exhibited severe deterioration of efficiency despite favorable conditions; and (3) 40% that masked operational deficiencies through technological growth. The study proposes a comparative diagnostic framework to identify specific gaps and prioritize operational improvement recommendations according to each company's profile.**

***Index Terms*—DEA, Malmquist index, efficiency measurement in SMEs.**

I. Introduction

Small and medium enterprises (SMEs) make up approximately 90% of businesses worldwide [1], generate more than 50% of global employment and contribute up to 40% of GDP in emerging economies [2]. SMEs also serve as crucial drivers of innovation, economic diversification, and local resilience. Their market proximity and operational flexibility make them particularly responsive to technological and social changes, yet simultaneously more vulnerable to economic volatility. This has prompted governments worldwide to implement targeted support policies including subsidies, tax exemptions, preferential credit access, and technical assistance programs.
The evaluation of SME efficiency and competitiveness has become paramount for policymakers, especially when optimizing the allocation of public resources [3]. Advanced analytical tools like Data Envelopment Analysis (DEA) enable the identification of firms that employ available resources (human, financial, technological) most efficiently, thereby facilitating more strategic distribution of subsidies and incentives [4]. This approach aligns with the growing emphasis on evidence-based policy making in development economics [3].
In Uruguay, SMEs represent over 95.58% of all enterprises and employ about 67.72% of the workforce [5]. While the country has experienced growth in its tertiary production matrix, with services as the primary value-added generator, corporate innovation indicators remain weak. The Innovation Activities Survey [6] revealed a concerning decline in service sector innovation, dropping from 31% in 2004-2006 to just 22% in the later period. This stagnation coincides with relative decreases in R&D investment, compromising both competitiveness and adaptive capacity in an evolving global landscape. In this context, systematic assessment of SME efficiency and competitiveness becomes indispensable. An empirical, data-driven approach enables the design of more effective support programs, facilitates targeted subsidy allocation to high-impact firms, allows for identification of sectoral or regional disparities, and provides robust measurement of public investment returns. Recent applications have shown that DEA is particularly suited for this analytical challenge, as it is a non-parametric methodology which can take into account the multidimensional performance metrics (financial, innovative, environmental) that characterize SME operations.
This article focuses on analyzing the efficiency of Uruguayan industrial SMEs using DEA methodology. The study is structured as follows: Section 2 presents the theoretical background, including a comprehensive literature review of DEA applications for SME efficiency measurement. Section 3 details the methodological framework and DEA model specifications. Section 4 describes the case study, focusing on the Uruguayan context and the dataset used for evaluating industrial SMEs. Section 5 presents the results analysis, comparing efficiency scores across different SME categories. Finally, Section 6 concludes with policy implications, study limitations, and directions for future research.

II. Related work

SMEs' relevance is growing in the current transition towards more sustainable, digitalized, and innovative economies. In this context, DEA has emerged as a key tool to measure the relative performance of these enterprises, enabling the comparison of multiple inputs and outputs without relying on a predefined production function [4].
Various studies have applied DEA to analyze different aspects of SME efficiency. Recent research has explored how combining lean practices with sustainability-oriented innovation (SOI) can enhance the overall performance of these enterprises. A

This work was partially funded by the STIC-AMSUD Project, Action 24-STIC-16 SEEPIRS.

notable study in this field by De et al. [7] demonstrated that SMEs manufacturing in India achieve an optimal balance between operational efficiency and sustainability by integrating waste reduction strategies with innovations in eco-design and waste management. This approach proves particularly valuable for resource-constrained SMEs, providing a clear framework for prioritizing actions and effectively allocating resources.

Beyond sustainability, DEA has also been used to assess environmental efficiency in European SMEs, revealing a significant gap between their ability to market green products and their performance in responsible resource use during production [8]. These findings highlight the need for targeted public policies, such as technical assistance and subsidies, to bridge this disparity. In digital transformation, studies on Chinese manufacturing SMEs have shown that adopting digital technologies improves servitization, though with heterogeneous results across sectors, underscoring the importance of tailoring strategies to the specific capabilities of each industry [9].

In the financial realm, research in Turkey has shown that many industrial SMEs could achieve their current results with fewer financial resources, a crucial finding in contexts where access to credit is limited [10]. Meanwhile, in Uruguay, analyses of innovation efficiency in the service sector have revealed that non-subsidized firms tend to be more efficient than those receiving state support, raising questions about the effectiveness of public funding programs [11]. Finally, evaluations of European SME support programs have shown that less developed regions tend to use public funds more efficiently, suggesting that institutional complexity in advanced regions may hinder resource optimization [11].

Together, these studies demonstrate the versatility of DEA as a tool to diagnose and improve small business performance in multiple dimensions. The work of De et al. [7] additionally provides an applicable framework for integrating sustainability and operational efficiency, offering valuable insights for both business managers and policy designers. The combination of these approaches could be key to strengthening SME competitiveness in an increasingly challenging economic environment.

III. Methodology

The methodology comprises two stages: (1) Calculation of annual efficiency (2020-2022) for each SME using DEA; (2) Application of Malmquist Index to measure the change in Total Factor Productivity (TFP) between 2020 and 2022, decomposed in technical efficiency and technological progress.

A. Data Sources

The dataset consists of anonymized firm-level microdata from Uruguay's Annual Economic Activity Survey (EAAE) conducted by the National Institute of Statistics (INE), covering fiscal years 2020 through 2022. The analysis focuses on food processing manufacturing firms (CIIU Rev. 4 divisions 10). The input-output structure was defined as follows:

Input Variables

- Annual labor costs: Total yearly expenditures on employee compensation.
- Year-end inventory value: Stock levels recorded on December 31st, including: Raw materials, Work in process, Finished goods.
- Annual professional services spending: Total yearly payments to consultants and external experts.
- Annual R&D expenditure: Total yearly investment in research activities.

Output Variable

- Total annual sales: Gross revenue from goods/services.

B. Theoretical Framework

In this study, two DEA models were used, namely the BCC model for variable returns to scale (VRS) and the CCR model for constant returns to scale (CRS). The dynamic productivity change was measured using the Malmquist Productivity Index. These methodologies, rooted in the work of Charnes, Cooper, and Rhodes [4] and Färe et al. [12], allow for a rigorous assessment of both cross-sectional technical efficiency and intertemporal total factor productivity (TFP) dynamics within the context of the SME.

1) DEA-CCR Model (CRS): The DEA-CCR model [4] evaluates the overall technical efficiency by assuming constant scale returns (CRS).

2) DEA-BCC Model (VRS): The DEA-BCC model [13] measures pure technical efficiency on a variable scale returns (VRS), isolating managerial performance from scale effects.

3) Malmquist Index: The Malmquist Productivity Index (MPI), developed by Caves, Christensen, and Diewert [14] and operationalized by Färe et al. [12], measures TFP change between two periods. Using DEA frontiers under constant returns to scale (CRS), it decomposes TFP evolution into:

$$\text{MPI}(t,t+1) = \underbrace{\left[\frac{D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}{D^{t}(x^{t},y^{t})}\right]}_{\text{Efficiency Change (Catch-up)}} \times \underbrace{\left[\frac{D^{t}(x^{t+1},y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})} \times \frac{D^{t}(x^{t},y^{t})}{D^{t+1}(x^{t},y^{t})}\right]^{1/2}}_{\text{Technological Change (Frontier-shift)}}$$

C. Data Processing

The analysis is based on an unbalanced panel of Uruguayan food manufacturing firms from the EAAE survey with:

- 2020: 209 firms
- 2021: 244 firms
- 2022: 241 firms

A balanced subpanel of 119 firms present in both 2020 and 2022 data enables longitudinal productivity comparison.

IV. Efficiency Analysis

As shown in Figure 1 analysis of productivity components reveals significant patterns in the evolution of companies between 2020 and 2022.

First, all companies show technological progress ($TechCh > 1$), indicating a positive change in the production frontier. This widespread improvement expanded the maximum possible

productive potential with available resources. In the post-pandemic context (2020-2022), this phenomenon may primarily reflect economic reactivation through recovered demand and higher utilization of installed capacity, coupled with realized economies of scale leading to reduced unit costs.

Although the technological frontier advanced consistently, companies' relative positions showed contrasting behaviors:

A significant group of 48 companies experienced declines in relative efficiency between 2020 and 2022 ($\overline{EffCh} = 0.57$), but benefited from technological change ($\overline{TechCh} = 4.74$), achieving net productivity gains ($\overline{TFPCH} = 2.42$). This pattern suggests that increased demand offset operational inefficiencies during the period.

Other 44 companies combined improvements in relative efficiency ($\overline{EffCh} = 2.97$) with a strong use of technological advancement ($\overline{TechCh} = 4.09$), improving their position in the new frontier and achieving exceptional productivity gains ($\overline{TFPCH} = 12.28$).

In contrast, 24 companies suffered severe efficiency failures ($\overline{EffCh} = 0.15$) that outweighed the benefits of technological change ($\overline{TechCh} = 3.84$), resulting in net productivity losses ($\overline{TFPCH} = 0.54$) despite favorable market conditions.

Only a small subset of 3 companies showed efficiency losses ($\overline{EffCh} = 0.29$) offset by technological progress ($\overline{TechCh} = 3.79$), maintaining stable productivity ($\overline{TFPCH} = 1.01$).

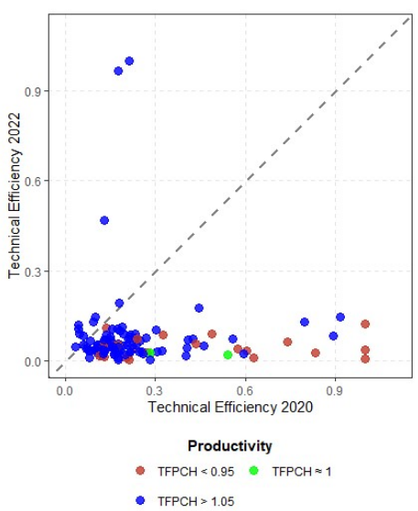


Fig. 1. Technical Efficiency and Productivity change

This distribution reveals that 77.3% of the companies (92/119) capitalized on technological change to improve productivity, while 20.2% (24/119) failed to adapt their operations. The decisive factor was how relative efficiency allowed companies to leverage the opportunities created by the shifting technological frontier.

V. Conclusions

DEA provides significant strengths by enabling precise diagnostics on technological adaptation and operational management. When applied to the Uruguayan SMEs data, it was revealed that while some companies appeared to be growing, they actually had underlying operational deficiencies, as well as critical risks in highly inefficient organizations that persisted despite their expansion.

Regarding the evaluated group of SMEs, although the technological frontier advanced significantly, 40% of the companies deteriorated their operational efficiency. This suggests a lack of process optimization, where many firms relied on favorable market conditions to compensate for their inefficiencies.

However, companies that combined technological change with operational improvements achieved productivity gains five times higher than average, thus securing a sustainable competitive advantage.

In future work, we plan to analyze specific operational variables that explain the efficiency variability detected in this SME group.

References

[1] OECD, SME and Entrepreneurship Outlook 2019. Paris: OECD Publishing, 2019. [Online]. Available at: https://doi.org/10.1787/34907e9c-en.

[2] World Bank Group, "Small and Medium Enterprises Finance," World Bank, 2023. [Online]. Available at: https://www.worldbank.org/en/topic/smefinance

[3] C. Henriques, M. Catarino, A. S. Costa y R. F. Marques, "A two-stage DEA approach for evaluating the efficiency of R&I investments in SMEs," Journal of Innovation & Knowledge, vol. 7, no. 4, 2022. [Online]. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100190.

[4] A. Charnes, W. W. Cooper y E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units," European Journal of Operational Research, vol. 2, no. 6, pp. 429–444, 1978.

[5] INE Uruguay, "Demografía de empresas 2023", Montevideo, Uruguay, 2024. [Online]. Available at: https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/empresas-mpymes-uruguay.

[6] ANII, "Encuesta de Actividades de Innovación 2010–2012," Agencia Nacional de Investigación e Innovación (Uruguay), 2015. Available at: https://www.anii.org.uy/upcms/files/listado-documentos/documentos/encuesta-de-actividades-de-innovaci-n-en-la-industria-manufacturera-y-servicios-seleccionados-2010-2012.pdf.

[7] D. De, S. K. Chowdhury, S. Dey y S. Ghosh, "Integrating Lean Practices and Sustainability-Oriented Innovation in Indian SMEs: A DEA-Based Evaluation Framework," Journal of Cleaner Production, vol. 274, 2020. [Online]. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122914.

[8] J. Sanz-Torró, M. Segarra-Blasco y M. Teruel, "Firm eco-innovation and green market efficiency: A European SME assessment with DEA-bootstrap," Small Business Economics, 2025. [Online]. Available at: https://doi.org/10.1007/s11365-025-01098-1.

[9] W. Gao, B. He, X. He y J. Chen, "Digital transformation and servitization in manufacturing SMEs: Efficiency assessment using DEA and Malmquist index," Information & Management, vol. 60, no. 3, 2023. [Online]. Available at: https://doi.org/10.1016/j.im.2023.103784.

[10] A. Büyükkeklik, H. Dumlu y S. Evci, "Measuring the Efficiency of Turkish SMEs: A Data Envelopment Analysis Approach," International Journal of Economics and Finance, vol. 8, no. 6, pp. 190–200, 2016. [Online]. Available at: https://doi.org/10.5539/ijef.v8n6p190.

[11] V. Ladós, Medición de la eficiencia técnica innovadora en el sector servicios: una aplicación del Análisis Envolvente de Datos para el caso de Uruguay, Tesis de grado, Facultad de Ciencias Económicas y Administración, Universidad de la República, Montevideo, 2018.

[12] Färe, Rolf, et al. "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries." The American Economic Review, vol. 84, no. 1, pp. 66–83, 1994.

[13] Banker, R. D., et al. "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis." Management Science, vol. 30, no. 9, pp. 1078–92, 1984.

[14] Caves, Douglas W., et al. "The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity." Econometrica, vol. 50, no. 6, pp. 1393–414, 1982.

Session N°3 – Track N°4

Network Design and Location

Chair: Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
Place: X-103
Time: 15:40 – 16:55

Propuesta de Red Logística para la Transformación de Residuos Orgánicos en Biometano

Time: 15:40 – 15:55
Authors:

- Pulfer, JC. *(Universidad Nacional de Asunción)*
- Benítez-Gómez, A. *(Universidad Nacional de Asunción)*
- Herrera-Rivera, S. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Diseño de Red para la Recolección de Desechos Orgánico, Transformación y Distribución de Compost

Time: 16:00 – 16:15
Authors:

- Mendoza-Burgos, S. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Oyanedel-Garcés, B. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Rivillo-Carreño, J. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Blázquez, C. *(Universidad Andrés Bello)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Diseño de Red de Teleféricos para la Ciudad de Valparaíso

Time: 16:20 – 16:35
Authors:

- Escobar-Mieres, D. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Góngora-Leiva, C. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Lillo-Quintana, C. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Pinto-Rojas, I. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Simulating the Impact of Earthquake Failures and Aftershocks on a Telecommunication Network in Chile

Time: 16:40 – 16:55
Authors:

- Jiménez, D. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Plaza-Vega, F. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Nicolis, O. *(Universidad Andrés Bello)*

Propuesta de red logística para la transforamción de residuos orgánicos en biometano

Jean-Claude Pulfer
Departamento de Ingeniería Mecánica y Electromecánica
Universidad Nacional de Asunción
Asunción, Paraguay
jcpulfer@ing.una.py

Alberto Benítez-Gómez
Programa de Magíster en Ingeniería Industrial Producción
Univesidad Nacional de Asunción
Asunción, Paraguay
abenitez@ing.una.py

Sebastián Herrera-Rivera
Programa de Magíster en Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
sebastian.herrera.r@mail.pucv.cl

Gabriel Gutiérrez-Jarpa
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl

Germán Paredes-Belmar
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl

Abstract*—El crecimiento de la población y la globalización han incrementado significativamente el intercambio de productos entre distintos países. Esto ha impulsado un aumento en la producción de alimentos a nivel global, lo que, a su vez, ha generado una elevada cantidad de residuos orgánicos tanto en las plantas productoras como en los centros de consumo poblacional. Una alternativa sostenible para enfrentar este desafío consiste en aprovechar estos residuos orgánicos y transformarlos en biometano, un recurso energético que puede ser utilizado en aplicaciones industriales como el transporte, la generación eléctrica, la calefacción, entre otras. En este contexto, se propone un modelo de programación lineal entera mixta para el diseño de una red de transformación de residuos orgánicos en biometano. El objetivo del modelo es minimizar los costos totales asociados al transporte, la localización de plantas y el procesamiento, al mismo tiempo que se maximizan los ingresos generados por la venta de biometano y sus subproductos.

Diseño de red para la recolección de desechos orgánico, transformación y distribución de compost

Sebastián Mendoza-Burgos
Programa de Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
sebastian.mendoza.b@mail.pucv.cl

Benjamín Oyanedel-Garcés
Programa de Ingeniería Civil Industrial,
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
benjamin.oyanedel.g@mail.pucv.cl

Joaquín Rivillo-Carreño
Programa de Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
joaquin.rivillo.c@mail.pucv.cl

Germán Paredes-Belmar
Escuela de Ingeniería Industrial Pontificia,
Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
german.parades@pucv.cl

Carola Blazquez
Departamento en Ciencias de la Ingeniería,
Universidad Andrés Bello
Viña del Mar, Chile
cblazquez@unab.cl

Gabriel Gutiérrez-Jarpa
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl

Resumen— La gestión eficiente de los residuos orgánicos representa un desafío prioritario para avanzar hacia un modelo de desarrollo sostenible, especialmente en entornos urbanos donde la generación de desechos es elevada y su disposición inadecuada genera impactos ambientales y sociales significativos. En Chile, se producen anualmente cerca de cinco millones de toneladas de residuos orgánicos, de los cuales una fracción mínima es valorizada. Frente a esta problemática, el compostaje se presenta como una alternativa eficaz que permite transformar los residuos en un producto de valor agregado, mejorando la calidad del suelo y contribuyendo a la reducción de la huella de carbono. En este contexto, el presente trabajo propone un modelo de programación lineal entera mixta (PLEM) orientado al diseño estratégico-táctico de una red logística que integra las etapas de recolección, procesamiento y distribución de compost, considerando decisiones de localización de plantas, número de pilas de compostaje y flujos de transporte, con el objetivo de minimizar los costos totales del sistema en un horizonte de planificación de largo plazo. Finalmente, se desarrollaron instancias test que permitieron evaluar su desempeño y capacidad de respuesta ante diferentes configuraciones de red, obteniendo resultados óptimos en tiempos computacionales adecuados.

Diseño de Red de Teleféricos para la Ciudad de Valparaíso

Daphne Escobar-Mieres
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
daphne.escobar.m@mail.pucv.cl

Cristóbal Góngora-Leiva
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
cristobal.gongora.l@mail.pucv.cl

Catalina Lillo-Quintana
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
catalina.lillo.q@mail.pucv.cl

Ignacia Pinto-Rojas
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
ignacia.pinto.r@mail.pucv.cl

Gabriel Gutiérrez-Jarpa
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@ pucv.cl

Germán Paredes-Belmar
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
german.paredes@pucv.cl

***Resumen*—La geografía irregular de Valparaíso ha dificultado históricamente la conexión entre sus sectores altos y el plan de la ciudad, generando problemas de movilidad urbana y acceso desigual a servicios esenciales. Frente a este contexto, se propone un modelo de diseño de redes de teleféricos como alternativa de transporte sostenible, eficiente y de bajo impacto ambiental. La problemática se aborda mediante un modelo de programación lineal entera mixta que considera la instalación de estaciones, la construcción de líneas de conexión de teleféricos y la cobertura de población dentro de un radio determinado, sujeto a restricciones presupuestarias y operacionales. Para su validación, se genera una instancia georreferenciada de Valparaíso con estimaciones de datos reales de población, distancias y costos. Los resultados muestran que es posible cubrir un 80,5% de la población objetivo con el 94,9% del presupuesto, mediante la instalación de 6 estaciones y 5 líneas de teleférico. Finalmente, se propone la integración futura de la red con otros modos de transporte urbano para consolidar una red intermodal.**

Palabras Clave—movilidad urbana, teleféricos, diseño de redes, programación lineal entera mixta, cobertura, planificación territorial.

I. Introducción

En ciudades con geografía compleja e irregular, como Valparaíso, la falta de conectividad entre los sectores altos y bajos incide directamente en la movilidad urbana y en el acceso equitativo a sectores esenciales, como puede ser el Plan de la ciudad.

Actualmente, los tiempos de traslado al trabajo en el Gran Valparaíso superan los 45 minutos por trayecto, con múltiples sectores en situación de aislamiento físico y urbano [1].

Frente a este desafío, los teleféricos han sido implementados en diversas ciudades de Latinoamérica como una solución de transporte eficiente, que destaca por su bajo impacto ambiental dada su operación mediante energía eléctrica, lo que permitiría reducir más del 20% de las emisiones de CO_2 [2].

Además, su implementación ha demostrado tener efectos positivos en el desarrollo económico local, al incentivar el turismo y la actividad comercial en zonas excluidas, como se observó en Medellín, Colombia [2].

Esta investigación propone un modelo matemático para diseñar una red óptima de estaciones de teleférico, que busca maximizar la cobertura poblacional considerando variables topográficas, económicas y operacionales, con el fin de generar una alternativa sostenible, integrada y viable para mejorar la calidad de vida urbana en Valparaíso.

La Figura 1 ilustra un ejemplo de topología de teleféricos con la cobertura de cada estación.

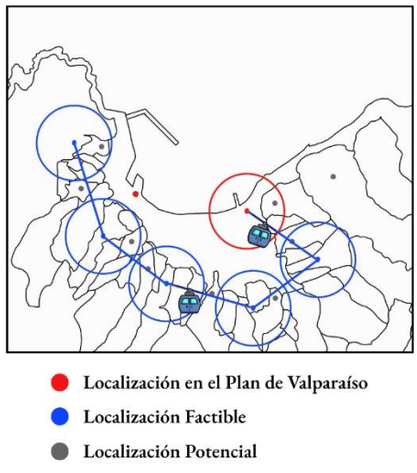


Fig. 1. Esquema del problema a resolver

II. METODOLOGÍA

El presente estudio se estructura en tres etapas fundamentales: construcción del modelo matemático, generación de una instancia basada en datos reales y validación del problema.

En primer lugar, se formuló un modelo de programación lineal entera mixta cuyo objetivo es maximizar la cobertura poblacional mediante la ubicación óptima de estaciones de teleférico y las conexiones entre estas. La formulación considera restricciones clave, tales como un presupuesto total disponible, límite de cobertura geográfica por estación (de acuerdo con el radio de cobertura), la obligación de conectar al menos una estación con el Plan de Valparaíso, con el fin de garantizar accesibilidad al centro de la ciudad, y la necesidad de evitar ciclos y bifurcaciones en la red, de modo que se garantice una estructura lineal y conectada. El modelo fue construido considerando estructuras similares utilizadas en problemas de cobertura y diseño de redes urbanas.

En segundo lugar, se generó una instancia georreferenciada a escala real de la ciudad de Valparaíso. Como se puede observar en la Figura 2, se definieron 16 nodos como ubicaciones potenciales de estaciones, 56 aristas o posibles conexiones entre estaciones (solo si la distancia entre ellas es menor a 2.000 metros), y 30 puntos de demanda poblacional. Las distancias se calcularon con herramientas de georreferenciación, mientras que cada punto de demanda poblacional fue estimado usando datos de población por cerro obtenidos en el INE [4]. Los costos de instalación y construcción se parametrizaron con base en valores referenciales de proyectos similares y ajustados a escala local del estudio.

Por último, para la validación del modelo, se implementó en el software AMPL utilizando el solver CPLEX, lo que permitió obtener soluciones factibles bajo los parámetros establecidos. La consistencia del modelo fue verificada a través de análisis de sensibilidad, tanto del presupuesto total disponible como del radio de cobertura, y revisión del cumplimiento de las restricciones estructurales, tales como conectividad de la red, cobertura poblacional efectiva, y la no formación de ciclos. Adicionalmente, la solución fue visualizada mediante la herramienta yEd, permitiendo representar gráficamente la red de estaciones y líneas propuesta, y corroborar la coherencia espacial del diseño.

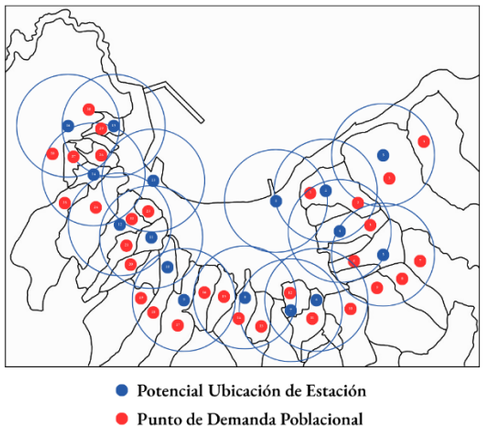


Fig. 2. Esquema de la instancia modelada

III. RESULTADOS PRELIMINARES

A partir de la ejecución computacional del modelo, se obtuvo una solución, como se muestra en la Figura 3, que contempla la instalación de 6 estaciones de teleférico y la construcción de 5 líneas entre ellas, sobre un total de 16 ubicaciones potenciales y 56 posibles conexiones que se consideran en la instancia.

De los 30 puntos de demanda poblacional, 23 resultaron cubiertos, lo que representa un 76,7% de puntos cubiertos. No obstante, al considerar la población asociada a cada punto de demanda, se observa una cobertura de 168.300 personas, equivalente al 80,5% de la cobertura máxima posible.

El diseño propuesto respetó todas las restricciones impuestas. De acuerdo con el presupuesto total disponible, que fue fijado en 63,2 millones de dólares, este fue utilizado de manera eficiente, alcanzando un costo total de implementación de 60 millones de dólares, lo que representa un 94,9% del presupuesto asignado.

Estos resultados evidencian que el modelo priorizó la cobertura de aquellas zonas con mayor concentración poblacional, maximizando el beneficio social del proyecto. Además, la red resultante presentó una estructura lineal, conectada y viable desde el punto de vista técnico-operacional.

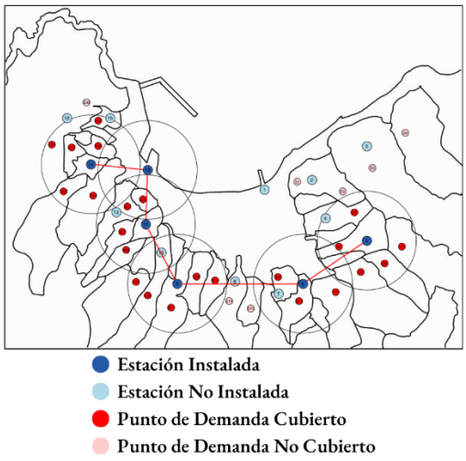


Fig. 3. Representación gráfica de la instancia resuelta

IV. Conclusiones y trabajos Futuros

Los resultados obtenidos permiten concluir que la implementación de redes de teleféricos, basada en un enfoque de optimización matemática, constituye una alternativa factible, eficiente y sostenible para mejorar la movilidad en contextos urbanos con una topografía compleja, como es el caso de Valparaíso. El modelo propuesto permitió alcanzar un alto nivel de cobertura poblacional, manteniéndose dentro de los límites presupuestarios y respetando las restricciones impuestas.

Además, se demostró que una planificación estratégica apoyada en datos reales, como distancias georreferenciadas, estimaciones poblacionales y costos referenciales, permite construir soluciones urbanas integradas con un alto impacto territorial. La incorporación de software y herramientas computacionales como AMPL y yEd contribuye significativamente al proceso de validación y análisis del diseño.

Cabe destacar que, debido a su estructura generalizable y al uso de parámetros ajustables (como costos, distancias y demanda poblacional), el modelo desarrollado es escalable y adaptable a otras ciudades con geografía irregular, ampliando así su aplicabilidad como herramienta de planificación territorial replicable.

Como líneas futuras de desarrollo, se propone ampliar el modelo con el objetivo de integrar la red de teleféricos con otros modos de transporte urbano, como el Metro Valparaíso (Merval), ascensores patrimoniales, líneas de microbuses y colectivos, con el fin de consolidar una red de transporte intermodal más eficiente y accesible. Esta integración requerirá incorporar nuevas variables y restricciones al modelo, considerando aspectos como la proximidad entre estaciones, el tiempo de transbordo y la conectividad modal. Asimismo, podría ser relevante incorporar criterios sociales y ambientales, permitiendo priorizar sectores más vulnerables o zonas con menos acceso a servicios básicos.

Referencias

[1] C. Larraín and A. Fuentes, *Tiempos de traslado y jornada laboral: análisis para el Gran Valparaíso*, Centro de Estudios Públicos (CEP), Santiago, Chile, Sept. 2022. [Online]. Available: https://static.cepchile.cl/uploads/cepchile/2022/09/pder594_afuentes_clarrain.pdf

[2] M. Flesser and B. Friedrich, "Are we taking off? A critical review of urban aerial cable cars as an integrated part of sustainable transport," *Sustainability*, vol. 14, no. 20, Art. no. 13560, Oct. 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su142013560

[3] Instituto Nacional de Estadísticas (INE), *Población y vivienda, región de Valparaíso*, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/poblaci%C3%B3n-y-vivienda-valpara%C3%ADso.pdf

Simulating the Impact of Earthquake Failures and Aftershocks on a Telecommunication Network in Chile

Dora Jiménez
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
dora.jimenez.a@edu.uai.cl

Francisco Plaza-Vega
Facultad de Ciencia
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
francisco.plaza.v@usach.cl

Orietta Nicolis
Engineering Faculty
Universidad Andrés Bello
Viña del Mar, Chile
orietta.nicolis@unab.cl

***Abstract*—Telecommunication networks play a fundamental role in modern society, especially during emergency situations. In a highly seismic country like Chile, maintaining the reliability of these networks against earthquakes and aftershocks represents a critical challenge. Traditional seismic analysis approaches often underestimate the cumulative impact of aftershock sequences and the geographic correlation of faults. This work proposes an innovative analytical framework that integrates the Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model within the Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) methodology to simulate the combined impact of the mainshock and its aftershocks on the REUNA academic and scientific network. The network is modeled as a graph, where nodes and links are evaluated using fragility curves and physical parameters such as spectral acceleration (SA), permanent ground displacement (PGD), and cable vulnerability. By combining local Ground Motion Prediction Equations (GMPEs), aftershock generation via ETAS, and Monte Carlo simulations, a dynamic and realistic assessment of network reliability under extreme seismic scenarios is obtained. Preliminary results show that including aftershocks allows identification of critical components and vulnerabilities that remain undetected when considering only the mainshock. This methodology not only improves emergency management and network design for REUNA but can also be adapted to other interconnected infrastructures—such as electrical grids—to enhance their resilience against seismic events and cascading failures.**

***Index Terms*—Telecommunication network reliability, seismic aftershocks, fragility functions, seismic risk analysis, simulation.**

I. Introduction

Chile is one of the most seismically active countries in the world, posing a critical challenge to the operational continuity of telecommunication networks such as REUNA, which support academic, scientific, and emergency activities. The occurrence of mainshocks and their aftershocks can simultaneously affect multiple links, reducing network connectivity and reliability. Studies like Jiménez et al. (2023) [1], [8] have shown that natural disasters generate geographically correlated failures impacting nodes and arcs concurrently, and that topology-based metrics alone underestimate the true risk. Unlike previous work, this study integrates ETAS within the PSHA framework to include aftershock sequences and evaluate their cumulative effect on the network, quantifying the reduction in reliability relative to a mainshock-only analysis.

II. Methodology

The REUNA network is modeled as a graph, where nodes represent facilities housing communication equipment and arcs correspond to underground fiber-optic links connecting these nodes (Figure 1). For nodes, failure probability is determined via fragility curves relating expected spectral acceleration (SA) at the site to the structural typology of the building. These curves estimate the probability that a node suffers damage rendering it inoperative after an earthquake. For arcs, each link is partitioned into smaller segments to assess local damage. Failure probability of each segment is computed based on the estimated Peak Ground Acceleration (PGA) at its location, the permanent ground displacement (PGD) accounting for ground deformation due to sliding or liquefaction, and cable physical properties (material robustness and vulnerability). This approach follows Esposito et al. (2022) [5] for underground cables under seismic events, ensuring segment failures scale with link length.

PSHA-derived ground motions are estimated following the classical structure described by Baker et al. (2021) [2]. First, a seismic source model is generated; in our case, 17 Chile-specific seismic zones are calibrated to represent spatial variability of seismic hazard. This calibration feeds into the ETAS model to simulate aftershocks more realistically [6], [7]. Next, local GMPEs for Chile (Montalva et al., 2017) [3] are applied to estimate spectral acceleration as:

$$\mu\big(\ln(\mathrm{SA}(T))\big) = f(M_w, Z_h, D, \vec{\theta}, V_\mathrm{S30} \mid T) \quad (1)$$

Infrastructure vulnerability is characterized using fragility curves by structural typology [4]. Given spectral displacement S_d, the probability of being in or exceeding damage state ds is:

$$P[ds \mid S_d] = \Phi! \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln! \left(\frac{S_d}{\bar{S}d, ds} \right) \right] \quad (2)$$

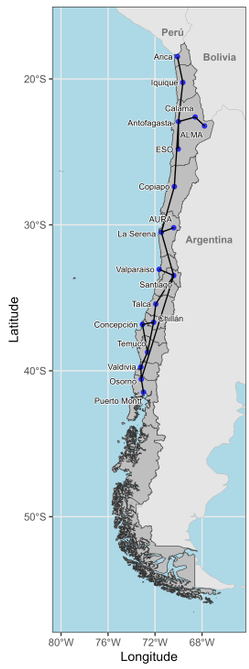


Fig. 1. Map of the REUNA optical-fiber backbone across continental Chile. Blue markers denote approximate geographic positions of institutional nodes (e.g., university and research facility buildings), and straight-line black segments represent idealized fiber links (arcs) connecting each node.

where $\bar{S} * d, ds$ is the mean spectral displacement (using SA(T)) at which the structure reaches damage state ds (moderate, extensive, complete), $\beta * ds$ is the standard deviation of the natural logarithm of S_d at state transition, and Φ is the standard normal CDF.

This corresponds to the third PSHA stage, computing component damage probabilities. We compute $PGA = SA(0)$ from Equation 1 with $T = 0$ and, with k_c, substitute into:

$$\begin{aligned}\ln(PGD) = 5.52 - \frac{4.43, k_c}{PGA} - 20.39\left(\tfrac{k_c}{PGA}\right)^2 \\ + 42.61\left(\tfrac{k_c}{PGA}\right)^3 - 28.74\left(\tfrac{k_c}{PGA}\right)^4 \\ + 0.72, \ln(PGA)\end{aligned} \tag{3}$$

The resulting PGD is used in:

$$FR_l = \alpha, (4.317, PGD - 0.324) \tag{4}$$

where α is the cable typology robustness parameter. We consider $\alpha = 0.26$ and $\alpha = 1.07$ for the least and most vulnerable cables. Due to lack of detailed liquefaction studies for all non-urban burial areas, a single parameter is assumed for the entire region.

Aftershocks with magnitude ¿5 within 24 hours post-mainshock are generated via ETAS [8]. Subsequently, Monte Carlo simulations assess network reliability under the mainshock and the post-disaster network subjected to these aftershocks.

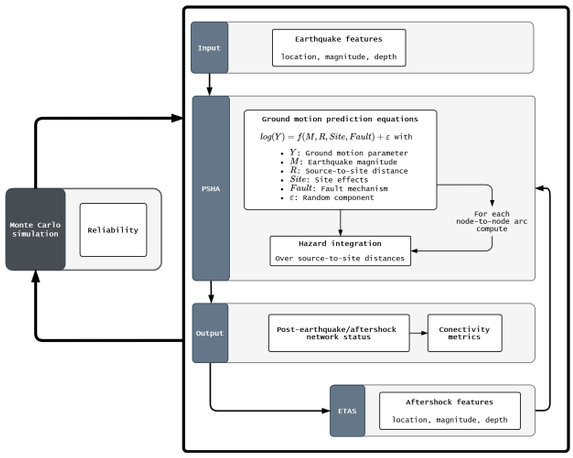


Fig. 2. General PSHA–ETAS simulation framework for evaluating seismic reliability of the REUNA optical-fiber network in Chile.

Figure 2 details the proposed workflow: seismic source modeling for 17 Chile zones, PSHA with local GMPEs, damage estimation for nodes (fragility) and arcs (failure rates via PGA and PGD), ETAS aftershock incorporation, and Monte Carlo simulation quantifying reliability metrics under extreme scenarios.

III. Results

Preliminary findings indicate that incorporating aftershocks through ETAS and partitioning arcs reveals vulnerable segments of the REUNA backbone with greater precision. The integration of seismic source probability, local GMPEs, and iterative Monte Carlo simulation provides a robust framework for hazard estimation and connectivity assessment under extreme events. This insight not only supports failure detection and emergency management for the optical-fiber network but is also transferable to other interconnected systems—such as electrical grids—to bolster resilience against seismic events and cascading failures.

Referencias

[1] Jiménez, D., Barrera, J., & Cancela, H. (2023). Communication Network Reliability Under Geographically Correlated Failures Using Probabilistic Seismic Hazard Analysis. IEEE Access, 11, 31341–31353.

[2] Baker, J., Bradley, B., & Stafford, P. (2021). Seismic hazard and risk analysis. Cambridge University Press.

[3] Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(2), 901-911.

[4] FEMA, H. (2003). Multi-hazard loss estimation methodology, earthquake model. Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency.

[5] Esposito, S., Botta, A., De Falco, M., Pacifico, A., Chioccarelli, E., Pescapè, A., ... & Iervolino, I. (2022). Seismic risk analysis of a data communication network. Sustainable and Resilient Infrastructure, 7(5), 655-672.

[6] Molina, D., Tassara, A., Abarca, R., Melnick, D., & Madella, A. (2021). Frictional segmentation of the Chilean megathrust from a multivariate analysis of geophysical, geological, and geodetic data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(6), e2020JB020647.

[7] Nicolis, O., Chiodi, M., & Adelfio, G. (2015). Windowed ETAS models with application to the Chilean seismic catalogs. Spatial Statistics, 14, 151-165.
[8] Jimenez, D., & Medina, A. (2023). Resilience of a telecommunications network subjected to correlated geographical failures. Reliability: Theory & Applications, 18(2 (73)), 315-326.

Session N°4 – Track N°1

OR Applications in Agriculture

Chair: Albornoz, V. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
Place: G6-054
Time: 17:30 – 18:45

Diseño de Red para Transformar Desecho Orgánico Agrícola en Alimento Animal Considerando las Emisiones de CO2 Equivalente

Time: 17:30 – 17:45
Authors:

- Valdebenito-Ferrando, C. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Mitchell-González, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Ortiz-Moreno, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Varela-Bastías, S. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Ortiz-Araya, V. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Modelos de Programación no Lineal Entera Mixta y Heurísticas para Problema de Manejo de Zonas de Sitio Específico

Time: 17:50 – 18:05
Authors:

- Urbán-Rivero, L. *(Instituto Tecnológico Autónomo de México)*
- Velasco-Álvarez, J. *(Centro de Investigación en Matemáticas de México)*

Optimización del Proceso de Cosecha de Cerezas: Una Revisión de Literatura

Time: 18:10 – 18:25
Authors:

- Acevedo-Meneses, D. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Espinoza-Pérez, A. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Enfoque de Descomposición de Benders para resolver un Modelo Binivel con Múltiples Seguidores en la Planificación de Cosecha

Time: 18:30 – 18:45
Authors:

- Albornoz, V. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Villanueva, C. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*

Diseño de red para transformar desecho orgánico agrícola en alimento animal considerando las emisiones de CO_2 equivalente

Catalina Valdebenito – Ferrando
Programa de Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
catalina.valdebenito.f@mail.pucv.cl

Fernanda Mitchell – González
Programa de Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
fernanda.mitchell.g@mail.pucv.cl

Felipe Ortiz – Moreno
Programa de Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
felipe.ortiz.m@mail.pucv.cl

Sergio Varela – Bastías
Programa de Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
sergio.varela.b@mail.pucv.cl

Virna Ortiz – Araya
Departamento de Gestión Empresarial
Universidad del Bío-Bío
Chillán, Chile
viortiz@ubiobio.cl
0000-0002-3890-0229

Gabriel Gutiérrez – Jarpa
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl
0000-0003-2931-0574

***Resumen*—El crecimiento poblacional ha impulsado la expansión de las áreas agrícolas para satisfacer la demanda de alimentos, situación que ha incrementado la generación de residuos orgánicos y, con ello, los costos de gestión para los municipios encargados de su recolección y disposición final. Además, la capacidad de los vertederos en diversas regiones de Chile está alcanzando su límite, proyectándose la saturación de éstos en los próximos años. En este contexto, los residuos orgánicos generados tanto en la producción como en la comercialización se consideran desechos y habitualmente se destinan a vertederos sanitarios desaprovechando su potencial de valorización. Ante este escenario, se propone una estrategia de gestión de residuos orgánicos agrícolas mediante el diseño de una red de recolección y un sistema de transformación que permita convertir dichos residuos en productos alimenticios aptos para el consumo animal. Esta problemática se aborda mediante un modelo de programación lineal entera mixta que considera: la recolección de residuos orgánicos agrícolas, la localización de plantas de transformación y la distribución del producto final a las granjas, ponderando simultáneamente los costos económicos de las emisiones de CO_2 equivalente reduciendo la generación de emisiones en el sistema. El resultado del estudio muestra que, mediante el modelo propuesto, es posible recolectar residuos, localizar plantas de transformación y distribuir productos finales a granjas de animales, para un caso de prueba.**

Palabras Claves*—*Material orgánico agrícola, diseño de redes, modelo de programación lineal entera mixta, CO_2.

Modelos de programación no lineal entera mixta y heurísticas para problema de Manejo de Zonas de Sitio Específico

1st Luis E. Urbán-Rivero
Departamento de Ingeniería Industrial y Operaciones
Instituto Tecnológico Autónomo de México
Ciudad de México, México
luis.urban@itam.mx

2nd Jonás Velasco-Álvarez
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación
Centro de Investigación en Matemáticas
Aguascalientes, México
jvelasco@cimat.mx

***Abstract*—Este trabajo presenta un análisis comparativo de dos enfoques de optimización para el problema de Manejo de Zonas de Sitio Específico (SSMZ) en agricultura de precisión: un modelo de Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP) basado en restricciones de flujo y una formulación con restricciones perezosas. Ambos modelos buscan dividir terrenos agrícolas en regiones homogéneas minimizando el número de zonas y garantizando un nivel de homogeneidad especificado (α). Se propone una heurística de desconexión para inicializar los modelos de optimización, mejorando la eficiencia computacional. Los resultados demuestran que el modelo basado en flujo supera al de restricciones perezosas para valores bajos de α ($\alpha \leq 0.7$), logrando mejor calidad de solución y menores brechas de optimalidad. Las estrategias híbridas que combinan heurística con optimización muestran mejoras significativas, reduciendo tiempos de solución y aumentando robustez.**

***Index Terms*—component, formatting, style, styling, insert**

I. Introduction

Los avances metodológicos y tecnológicos han permitido un aprovechamiento óptimo de recursos energéticos, agrícolas y otros. En el ámbito agrícola, esto se ha traducido en el desarrollo de un marco teórico conocido como agricultura de precisión, que integra conocimientos y tecnologías para optimizar el uso de los recursos y aumentar el rendimiento de los cultivos, siempre bajo criterios de sostenibilidad.

Dentro de la agricultura de precisión, uno de los principales retos es la gestión óptima de los cultivos. En grandes extensiones de terreno, es poco probable que la concentración de nutrientes sea homogénea. Para abordar este problema, se emplea el Manejo de Zonas de Sitio Específico (SSMZ, por sus siglas en inglés), un enfoque que divide el terreno en subregiones con propiedades físico-químicas y niveles de nutrientes lo más uniformes posibles.

El número de zonas generadas incide directamente en los costos de gestión, ya que cada una requiere un tratamiento específico del suelo. Por tanto, a mayor número de zonas, mayor frecuencia de cambios en las prácticas agrícolas.

En esencia, el SSMZ busca lograr un equilibrio: dividir el terreno en el menor número posible de regiones, pero garantizando un nivel aceptable de homogeneidad dentro de cada una.

II. Antecedentes

El SSMZ es un problema que ha sido abordado desde múltiples enfoques. Las primeras investigaciones utilizaron metodologías de aprendizaje automático como k-means [1]–[4] y fuzzy k-means [5], [6] , combinadas con sistemas de información geográfica (SIG). Aunque estos métodos producen zonificaciones precisas, presentan limitaciones prácticas: generan zonas discontinuas y de formas irregulares que resultan difíciles de manejar con la maquinaria agrícola actual (como tractores).

Posteriormente, para adaptarse a la tecnología agrícola disponible, el SSMZ se reformuló como un problema de optimización combinatoria. Este enfoque empleó programación entera, modelándolo como un problema de partición de conjuntos [7]. Se han explorado diversas variantes del método, incluyendo:

- Restricciones de proximidad [8].
- Partición multivariable (evaluación simultánea de múltiples parámetros) [9].
- Manejo de terrenos con geometrías irregulares [10].

Estas soluciones generan exclusivamente regiones rectangulares, compatibles con la maquinaria agrícola convencional. Sin embargo, su principal limitación reside en la necesidad de generar subconjuntos, lo que las vuelve computacionalmente inviables incluso para problemas de escala moderada.

Para abordar los desafíos de dimensionalidad en el SSMZ formulado como problema de partición de conjuntos, se han desarrollado algoritmos evolutivos. La investigación pionera [11] introdujo un enfoque que:

- Permite regiones de formas ortogonales (no solo rectangulares).
- Emplea algoritmos evolutivos para optimizar su configuración

Posteriores mejoras incluyeron:

- Un esquema de evaluación de soluciones más eficiente [12].
- Modificaciones en la función objetivo para mejorar la calidad de las soluciones [12].

En [10] se propuso un algoritmo genético que mantiene el enfoque de partición de conjuntos, pero restringiendo las regiones a formas rectangulares.

Como desarrollo final en el abordaje del SSMZ, se ha explorado enfoques basados en teoría de grafos. Un primer planteamiento [13] propone representar la superficie agrícola mediante un grafo, implementando una heurística voraz que, si bien muestra un rendimiento inferior al de los algoritmos evolutivos, destaca por sus tiempos de ejecución reducidos. Posteriormente, basándose en esta representación gráfica, otro trabajo [14] desarrolló un modelo de programación no lineal entera mixta. Este modelo presenta varias ventajas significativas: genera regiones ortogonales sin requerir la creación de subconjuntos previos, permite comprender la estructura del problema y establece las bases para el desarrollo de nuevas heurísticas.

III. Definición del problema

Consideremos una superficie rectangular M subdividida en $|M|$ celdas rectangulares, donde cada celda contiene un valor numérico que representa una propiedad físico-química específica o concentración de nutrientes.

El SSMZ se define como sigue:

- **Entrada:** Una superficie agrícola dividida en $|M|$ zonas (muestras) de suelo, cada una con un valor numérico asociado, un parámetro $\alpha \in [0, 1]$, este parámetro representa un nivel de homogeneidad deseada.
- **Salida:** La superficie dividida en $Z = \{z_1, z_2, \ldots, z_K\}$ regiones, donde se busca que K sea mínimo y $H(M, Z) \geq \alpha$.

Donde $H(M, Z)$ se define como

$$H(M, Z) = 1 - \frac{\sum_{z \in Z}(|z| - 1) \cdot s^2(z)}{\sigma_T^2 \cdot (|M| - K)} \tag{1}$$

Donde $|z|$ es el número de zonas (muestras) dentro de una región, $s^2(z)$ es la varianza muestral de la región z y σ_T^2 es la varianza poblacional de toda la superficie.

IV. Metodología propuesta

En [14] se desarrolló un modelo MINLP (Mixed-Integer Nonlinear Programming) basado en flujos para construir bosques de expansión máxima. Como alternativa, nuestro trabajo presenta un nuevo modelo basado en el enfoque clásico de árboles de expansión máxima mediante subconjuntos junto con una implementación basada en el uso de restricciones perezosas (lazy constraints)

Adicionalmente se propone una heurística basada la eliminación de aristas con un criterio de borrado específico. Dicha heurística se utilizó como mecanismo de inicialización (warm start) tanto para el modelo basado en flujo como el basado en subconjuntos y se compararon los resultados.

A. Modelo MINLP para el SSMZ

Sea $G = (V, E)$ un grafo donde los vértices representan zonas de muestreo y las aristas conectan zonas geométricamente adyacentes. Las funciones $c : V \to \mathbb{R}^+$ y $d : E \to \mathbb{R}^+$ asignan valores a vértices (propiedades locales) y aristas (relaciones de adyacencia) respectivamente.

Parámetros y conjuntos

- V : Conjunto de vértices (zonas).
- V_k : Conjunto de vértices con el color k
- E : Conjunto de aristas.
- K: Conjunto de colores posibles (regiones).
- c_u : Valor numérico de la propiedad físico-química de la zona u (vértice u).
- $d_{uv} = |c_u - c_v|$:

Variables de decisión

$x_{u,k} = 1$ Si al vértice u se le asigna el color k. 0 En otro caso.
$y_{u,v,k} = 1$ Si la arista $\{u, v\}$ se le asigna el color k. 0 En otro caso.
$r_k = 1$ Si el color k se usa. 0 En otro caso.
$z_k =$ Número de vértices con el color k.
$\bar{z}_k =$ Valor medio de los vértices con el color k.
$d_{u,k} =$ Variable auxiliar que almacena el valor $|c_u - \bar{z}_k|$.
$p_{u,k} =$ Variable auxiliar que almacena el producto $d_{u,k} \cdot x_{u,k}$.
$\theta =$ Número de colores usados.

$$\min \ \theta \tag{2}$$

$$\sum_{u \in V} x_{u,k} = z_k, \quad k \in K \tag{3}$$

$$\sum_{k \in K} x_{u,k} = 1, \quad u \in V \tag{4}$$

$$\sum_{k \in K} r_k = \theta \tag{5}$$

$$x_{u,k} \leq r_k, \quad u \in V, k \in K \tag{6}$$

$$y_{u,v,k} \leq r_k, \quad \{u, v\} \in E, \ k \in K \tag{7}$$

$$r_k \leq \sum_{u \in V} x_{u,k}, \quad k \in K \tag{8}$$

$$\sum_{k \in K} y_{u,v,k} \leq 1, \quad \{u, v\} \in E \tag{9}$$

$$d_{u,k} = |c_u - \bar{z}_k \ u| \in V, k \in K \tag{10}$$

$$p_{u,k} = d_{u,k} \cdot x_{u,k} \ u \in, k \in K \tag{11}$$

$$y_{u,v,k} \leq x_{u,k} \cdot x_{v,k}, \quad (u, v) \in E, \ k \in K \tag{12}$$

$$\bar{z}_k \cdot z_k = \sum_{u \in V} c_u \cdot x_{u,k} \tag{13}$$

$$\sigma_T^2(|V| - \theta) \cdot (1 - \alpha) \geq \sum_{u \in V} \sum_{k \in K} (p_{u,k})^2 \tag{14}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{\{u,v\} \in E} y_{u,v,k} = |V| - \theta \tag{15}$$

$$\sum_{\{u,v\} \in E} y_{u,v,k} = z_k - r_k, \quad k \in K \tag{16}$$

$$\sum_{\{p,q\} \in S_k} y_{p,q,k} \leq |S_k| - r_k \quad S_k \subseteq V_k, V_k \subseteq V, k \in K \tag{17}$$

La expresión (17) genera un número exponencial de restricciones, por lo que se implementan como restricciones perezosas. El mecanismo opera de la siguiente manera:

1) Fase de verificación: Dada una solución candidata del modelo (2–16), se detecta la presencia de ciclos.
2) Fase de incorporación: Para cada ciclo identificado, se agrega dinámicamente la restricción correspondiente, cuya formulación es análoga a (17)

B. Heurística de desconexión

Para intentar mejorar los tiempos de ejecución, se propone una heurística de desconexión que se observa en el algoritmo 1

Algorithm 1 Heurística de desconexión

SSMZ_DESCONEXION(G)
1 $T \leftarrow MST(G)$
2 $E(T) \leftarrow ordenar(E(T))$
3 **while** $H(M, Z) < \alpha$ **and** $|E(T)| > 1$
4 $e \leftarrow$ seleccionar(T)
5 $T \leftarrow T \backslash \{e\}$
6 $Z \leftarrow$ codificar(T)
7 **return** T, Z

Donde MST(G) devuelve el árbol de máxima expansión de costo mínimo, la función seleccionar, toma la arista con el mayor valor para eliminarla y la función codificar(T) convierte un árbol o bosque en una instancia de SSMZ dividida en $|Z|$ regiones.

V. Resultados

Se implementaron cuatro enfoques en Python 3 usando Gurobi [15]: (1) modelo de flujo [14], (2) nuestro modelo con restricciones perezosas, (3) heurística de desconexión, y (4) versiones híbridas. Los resultados mostrados en la Fig 1 comparan seis configuraciones (Z^*, F, LC, H, $H + F$, $H + LC$) para $\alpha = 0.5$, ejecutadas en un Intel i7 con 16GB RAM.

- Z^*: Solución del estado del arte.
- F: Solución del modelo de flujo.
- LC: Solución del modelo de restricciones perezosas.
- H: Solución obtenida por la heurística de desconexión.
- $H + F$: Solución del modelo de flujo con solución inicial la generada por la heurística de desconexión.
- $H + LC$: Solución del modelo de restricciones perezosas con solución inicial la generada por la heurística de desconexión

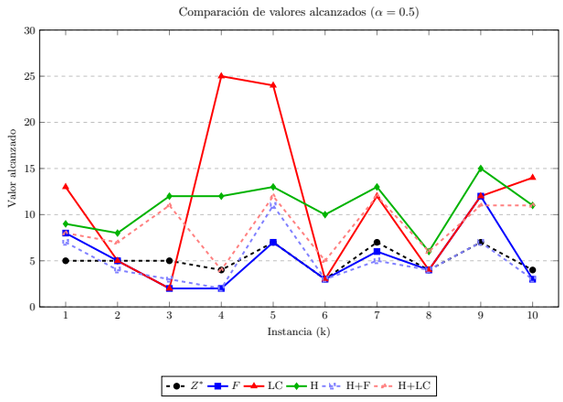


Fig. 1. Resultados de todas las implementaciones para $\alpha = 0.5$.

VI. Conclusiones y trabajo futuro

Del trabajo se puede decir que el modelo basado en flujo (F) destaca en escenarios donde α tiene valores bajos ($\alpha \leq 0.7$), entregando soluciones de mejor calidad y estabilidad, mientras que el modelo con restricciones perezosas (LC) se vuelve competitivo para valores altos de α. La heurística de desconexión propuesta (H) resulta efectiva como estrategia de inicialización, especialmente al combinarse con los modelos de optimización (H+F y H+LC), reduciendo el esfuerzo computacional y mejorando la factibilidad de las soluciones. Sin embargo, LC muestra limitaciones en casos extremos, produciendo resultados erráticos para α bajos. Las metodologías híbridas logran un equilibrio entre eficiencia computacional y precisión, siendo viables para aplicaciones prácticas donde la manejabilidad es prioritaria. Estos resultados subrayan la importancia de adaptar las estrategias de solución a las restricciones y objetivos específicos de cada problema en agricultura de precisión.

El trabajo futuro puede enfocarse en: (1) desarrollar heurísticas adaptativas que se ajusten dinámicamente a valores de α, (2) explorar mejoras metaheurísticas (ej. algoritmos genéticos o recocido simulado) para refinar estrategias de inicialización, (3) escalar los modelos para instancias más grandes usando computación distribuida, y (4) integrar optimización multiobjetivo para optimizar simultáneamente homogeneidad, número de zonas. Adicionalmente, extender el marco para manejar geometrías de terreno irregulares y heterogeneidad multiparámetro (ej. nutrientes del suelo, humedad) ampliaría su aplicabilidad. Finalmente, se requiere validación empírica mediante pruebas de campo para evaluar el desempeño práctico en condiciones reales.

REFERENCES

[1] T. Doerge, "Defining management zones for precision farming," *Crop Insights*, vol. 8, no. 21, pp. 1–5, 1999. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1999.tb00054.x

[2] R. A. Ortega and O. A. Santibáñez, "Determination of management zones in corn (zea mays l.) based on soil fertility," *Computers and Electronics in agriculture*, vol. 58, no. 1, pp. 49–59, 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.011

[3] R. E. Plant, "Site-specific management: the application of information technology to crop production," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 30, no. 1-3, pp. 9–29, 2001. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00152-6

[4] C. Fraisse, K. Sudduth, and N. Kitchen, "Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity," *Transactions of the ASAE*, vol. 44, no. 1, p. 155, 2001. [Online]. Available: https://doi.org/10.13031/2013.2296

[5] D. L. Corwin, "Site-specific management and delineating management zones," in *Precision agriculture for sustainability and environmental protection*. Routledge, 2013, pp. 135–157. [Online]. Available: https://doi.org/10.4324/9780203128329

[6] J. Ortega, "Definición de sub-rodales para una silvicultura de precisión: una aplicación del método fuzzy k-means." 2002. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.7764/rcia.v29i1.422

[7] N. M. Cid-Garcia, V. Albornoz, Y. A. Rios-Solis, and R. Ortega, "Rectangular shape management zone delineation using integer linear programming," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 93, pp. 1–9, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.01.009

[8] V. M. Albornoz and G. E. Zamora, "Decomposition-based heuristic for the zoning and crop planning problem with adjacency constraints," *Top*, vol. 29, no. 1, pp. 248–265, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11750-020-00580-z

[9] N. M. Cid-Garcia and O. J. Ibarra-Rojas, "An integrated approach for the rectangular delineation of management zones and the crop planning problems," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 164, p. 104925, 2019. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169918317162

[10] F. Huguet, L. M. Plà-Aragonés, V. M. Albornoz, and M. Pohl, "A genetic algorithm for site-specific management zone delineation," *Mathematics*, vol. 13, no. 7, 2025. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2227-7390/13/7/1064

[11] J. Velasco, S. Vicencio, J. A. Lozano, and N. M. Cid-Garcia, "Delineation of site-specific management zones using estimation of distribution algorithms," *International Transactions in Operational Research*, vol. 30, no. 4, pp. 1703–1729, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1111/itor.12970

[12] S. J. Vicencio-Medina, Y. A. Rios-Solis, and N. M. Cid-Garcia, "A bio-inspired optimization algorithm with disjoint sets to delineate orthogonal site-specific management zones," *Precision Agriculture*, vol. 26, no. 1, p. 14, 2025.

[13] L. E. Urbán Rivero, J. Velasco, and J. Ramírez Rodríguez, "A simple greedy heuristic for site specific management zone problem," *Axioms*, vol. 11, no. 7, p. 318, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/axioms11070318

[14] L. Urban-Rivero and J. Velasco, "A mixed integer nonlinear programming model for site-specific management zone problem," *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*, vol. 14, p. 1096, 04 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.11591/ijai.v14.i2.pp1096-1105

[15] L. Gurobi Optimization, "Gurobi optimizer reference manual," 2023, [Accessed Dec 1st, 2023]. [Online]. Available: "https://www.gurobi.com"

Optimización del proceso de cosecha de Cerezas: Una revisión de literatura

Diego Acevedo Meneses
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería
Universidad de Santiago de Chile (USACH)
Santiago, Chile
diego.acevedo.m@usach.cl

Andrea Espinoza Pérez
Departamento de Ingeniería Industrial
Programa para el Desarrollo de Sistemas Productivos Sostenibles (PDSPS)
Facultad de Ingeniería
Universidad de Santiago de Chile (USACH)
Santiago, Chile
andrea.espinozap@usach.cl

***Abstract*— Chile es actualmente el principal exportador mundial de cerezas, actividad que representa un pilar relevante para su economía agrícola. Sin embargo, el país enfrenta desafíos en la calidad del fruto debido a los daños mecánicos que ocurren durante la cosecha, etapa crítica dentro del proceso productivo. Este estudio tiene como objetivo revisar la literatura científica existente sobre la optimización de la cosecha de cerezas, identificando avances, brechas y oportunidades de investigación. Para ello, se aplicó la metodología PRISMA 2020, utilizando la base de datos Web of Science sin restricción temporal. La búsqueda arrojó 46 artículos, de los cuales solo 19 resultaron pertinentes al tema. Entre ellos, el 26% incorpora modelos matemáticos, principalmente orientados a la predicción de parámetros fisicoquímicos, asignación de recursos o procesos de postcosecha, pero ninguno aborda directamente la optimización del proceso de cosecha. Los resultados revelan una clara ausencia de investigaciones que integren herramientas de gestión de operaciones o modelación matemática aplicadas a la recolección del fruto. En este contexto, se evidencia la necesidad de desarrollar modelos específicos que permitan optimizar la eficiencia del proceso, reducir los daños mecánicos y mejorar la calidad del producto final, lo que representa una oportunidad relevante para la investigación aplicada en el sector frutícola chileno.**

Keywords—optimización, modelos matemáticos, cosecha, cerezas.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Enfoque de descomposición de Benders para resolver un modelo binivel con múltiples seguidores en la planificación de cosecha.

Víctor M. Albornoz
Departamnento. de Industrias
Universidad Técnica Federico Santa María.
Campus Santiago Vitacura, Chile
victor.albornoz@usm.cl

Carlos F. Villanueva
Departamnento. de Industrias.
Universidad Técnica Federico Santa María.
Campus Santiago Vitacura, Chile
carlos.villanuevah@sansano.usm.cl

***Abstract*— El trabajo aborda un problema de planificación agrícola que coordina las decisiones de cosecha del productor con las necesidades de demanda de múltiples distribuidores. Este problema se formula mediante un modelo jerárquico de programación binivel con múltiples seguidores, donde el productor, que actúa como líder, define las áreas de manejo, un plan de cosecha y las cantidades a ofertar. Por su parte, los distribuidores, como seguidores en el modelo binivel, toman decisiones sobre las cantidades a adquirir para satisfacer la demanda de sus mercados. El modelo propuesto se resuelve mediante una estrategia algorítmica basada en la Descomposición de Benders. La descomposición permite dividir el problema en un problema maestro y un subproblema binivel continuo, que es reformulado como un único nivel utilizando las condiciones de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Los resultados obtenidos en diferentes instancias resaltan la importancia del modelo y la metodología aplicada, mostrando su capacidad para generar soluciones adecuadas que permiten enfrentar de manera efectiva los desafíos del proceso de cosecha selectiva en un entorno agrícola sujeto a incertidumbre.**

Keywords—Método de Benders, optimización binivel estocástica, agricultura de precisión, zonas de manejo.

I. Introducción

Este trabajo propone un modelo estocástico de programación binivel con múltiples seguidores [1] para abordar la planificación conjunta de la cosecha y comercialización de un cultivo, en un contexto donde existe una relación jerárquica entre un productor y varios distribuidores. En esta estructura, el productor asume el rol de líder en el nivel superior, responsable de la planificación de la cosecha, mientras que en el nivel inferior los distribuidores actúan como seguidores de forma independiente; es decir, cada distribuidor atiende una demanda específica, determinada por su ubicación geográfica y las condiciones del mercado. Además, la relación entre estos últimos es no cooperativa, lo que implica que no comparten variables de decisión, restricciones ni objetivos.

La coordinación en la cadena de suministro se establece mediante contratos bilaterales entre el productor y los distribuidores. Estos acuerdos regulan la venta de la cosecha de un único cultivo para una temporada determinada, fijando un precio distinto para cada distribuidor y comprometiéndose, en conjunto, a adquirir la totalidad de la producción. No obstante, la existencia de múltiples seguidores y una cosecha limitada no siempre logrará cubrir la demanda total de cada distribuidor. Esto genera competencia entre los distribuidores, quienes actúan de forma no cooperativa para asegurarse una mayor porción del cultivo. En caso de que la asignación no sea suficiente, se contempla la posibilidad de incurrir en demanda insatisfecha.

El problema del productor integra principios de agricultura de precisión, en donde la zonificación del terreno juega un papel central. El terreno, de forma rectangular, se divide en una grilla uniforme, en la que cada celda representa un área de cultivo definida sobre la cual se toma una muestra de un único indicador vegetal. A partir de esta grilla se identifican zonas potenciales de manejo agrícola, formadas por conjuntos de celdas contiguas, cuya generación y formulación matemática se basa en [2]. Una vez definidas las potenciales zonas de manejo, el productor debe determinar la fuerza laboral necesaria para llevar a cabo la cosecha. Se consideran dos tipos de trabajadores: permanentes, que participan durante toda la temporada, y temporales, que refuerzan la mano de obra solo cuando resulta estrictamente necesario.

Adicionalmente, el modelo incorpora incertidumbre en tres parámetros clave: la demanda, los precios y los rendimientos, los cuales se representan a través de un número finito de escenarios. La demanda varía según factores económicos y preferencias de los consumidores; los precios fluctúan de acuerdo con la oferta, la demanda y las estrategias comerciales; y los rendimientos agrícolas dependen de condiciones climáticas impredecibles que afectan tanto la cantidad como la calidad de la producción.

Así, esta incertidumbre da lugar a un modelo estocástico de dos etapas, donde las variables de decisión del problema del productor corresponden, en la primera etapa, a la selección de zonas de manejo y a la planificación de la dotación de trabajadores permanentes; y en la segunda etapa, a la asignación de la cosecha, el uso de mano de obra temporal y horas extra, y el número de viajes requeridos para el transporte de la cosecha. Por su parte, las variables de cada distribuidor, definidas también en la segunda etapa, corresponden a la cantidad de producto adquirida al productor y a la demanda no satisfecha en cada escenario.

Los objetivos de los agentes son distintos. El productor busca maximizar su utilidad total, considerando tanto ingresos como costos operacionales. Por su parte, cada distribuidor busca minimizar los costos asociados a la demanda no satisfecha. Dado que los distribuidores compiten por un recurso escaso

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

como lo es la producción disponible, el problema adquiere un carácter no cooperativo que agrega complejidad al proceso de asignación.

II. Metodología

El modelo propuesto corresponde a un modelo estocástico lineal de optimización binivel con múltiples seguidores que se resuelve mediante un esquema de descomposición de Benders, que extiende la estrategia algorítmica presentada en [3] para problemas con un solo seguidor. La estrategia empleada en este artículo descompone una reformulación equivalente del modelo binivel en un subproblema correspondiente a las decisiones de segunda etapa del modelo estocástico y un Problema Maestro asociado a las decisiones de la primera etapa de dicho modelo.

Más precisamente, el subproblema considera una parte de las variables asociadas a la fuerza laboral, el número de viajes requeridos para el transporte de la cosecha, la cantidad de producción del productor, la asignación de esa producción a cada distribuidor, así como las cantidades de demanda insatisfecha. Por su parte, el Problema Maestro está vinculado a las decisiones de zonificación y a una parte de la planificación de la fuerza laboral, las cuales se modelan mediante variables binarias, todas ellas por escenario.

A su vez el subproblema, de naturaleza binivel, se formula de modo que permita la aplicación de las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), complementadas por una técnica de linealización basada en el método Big-M para representar las condiciones de complementariedad de modo lineal. Esta reformulación permite obtener un subproblema equivalente en términos de programación entera-mixta (MIP). A partir de la solución del MIP, se identifican las restricciones activas que se satisfacen en igualdad. Con esta información, se construye un modelo de programación lineal (PL), en el cual dichas restricciones se incorporan explícitamente como igualdades. La resolución secuencial del MIP y del PL permite generar cortes de factibilidad u optimalidad iteración tras iteración que se agregan al Problema Maestro de acuerdo a la manera usual del Método de Benders.

En una segunda etapa de la metodología, se resuelve el subproblema de forma individual para cada escenario. Es decir, en cada iteración del algoritmo se resuelven un modelo MIP y un modelo PL por escenario, lo que permite generar múltiples cortes de manera simultánea, que se agregan al problema maestro. Esta estrategia contribuye a acelerar significativamente la convergencia del algoritmo como muestran los resultados que siguen y resumen todo lo desarrollado en [4].

III. Resultados

El modelo se aplica a diez instancias asociadas a un caso de estudio real en la zona centro-sur de Chile, específicamente en un predio vitivinícola dedicado a la cosecha de uva de mesa. Las instancias representan un terreno que varía entre 3,2 y 10,4 hectáreas y se subdividen en una grilla uniforme que consideran entre 80 y 260 puntos de muestreo, lo cual genera entre 1.980 y 19.035 potenciales zonas de manejo.

Todos los experimentos se implementaron en AMPL 3.6.4 con el solver Gurobi 11.0.0, ejecutándose en un computador portátil Lenovo Legion con procesador Intel Core i7-10750H a 2.60 GHz y 16 GB de RAM.

Se utiliza como indicador la propiedad del cultivo conocida como NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que evalúa la densidad y salud de la vegetación. Este índice toma valores entre -1 y 1. Valores bajos indican menor densidad vegetal, asociados a menores rendimientos y tiempos de cosecha más cortos, mientras que valores altos reflejan mayor cobertura vegetal, lo que se traduce en rendimientos más altos y una cosecha más prolongada. En particular, los valores de NDVI utilizados oscilan entre 0,7641 y 0,7718 en el terreno.

Las instancias comprenden un horizonte de planificación entre 14 y 21 días, lo que se acompaña de una demanda creciente según la instancia, en línea con la expansión progresiva del predio. En todas las instancias, se considera un problema con uno y dos seguidores. En este último caso, la demanda del segundo distribuidor equivale a un tercio de la demanda del primero. El segundo distribuidor, a diferencia del primero, enfrenta precios de venta más bajos y costos más altos al adquirir cosechas de proveedores externos.

La Tabla I describe el tamaño de cada instancia. La primera columna indica el número de la instancia, la segunda columna señala el número de zonas potenciales, la tercera columna el número de puntos muestrales y la cuarta columna el número de periodos de planificación de cosecha. La quinta y sexta columna muestra el número de restricciones y variables del modelo de optimización binivel con un seguidor, respectivamente y lo mismo en las dos últimas columnas para el modelo con dos seguidores.

				Problema Binivel Estocástico		Problema Binivel Estocástico Con Múltiples Seguidores	
Instancia	$\|Z\|$	$\|S\|$	$\|T\|$	# Restricciones	# Variables	# Restricciones	# Variables
1	1.980	80	15	2.402.630	388.521	2.402.656	774.452
2	3.025	100	14	4.275.183	553.990	4.275.209	1.104.394
3	4.290	120	14	7.263.848	785.490	7.263.874	1.566.114
4	5.775	140	14	11.394.973	1.057.235	11.394.999	2.108.129
5	7.480	160	14	16.853.358	1.369.260	16.853.384	2.730.464
6	9.405	180	21	35.674.467	2.577.577	35.674.493	5.144.895
7	11.550	200	21	48.661.472	3.165.297	48.661.498	6.318.200
8	13.915	220	21	64.469.537	3.813.312	64.469.563	7.611.860
9	16.500	240	21	83.375.862	4.521.637	83.375.888	9.025.890
10	19.305	260	21	105.657.647	5.290.187	105.657.673	10.560.205

TABLE I. Tamaño de cada instancia resuelta.

A continuación, la Tabla II presenta los resultados computacionales obtenidos al resolver el modelo con dos distribuidores, utilizando el enfoque de descomposición de Benders con y sin múltiples cortes que se agregan al problema maestro en cada iteración. La primera columna indica el número de instancia, la segunda, tercera y cuarta columna reportan el número de iteraciones, tiempo de resolución (en segundos) y error relativo en el uso del método de Benders con un solo corte de optimalidad, respectivamente. Del mismo modo, las tres últimas columnas indican el número de iteraciones, el tiempo de resolución y el GAP relativo alcanzado en la estrategia con múltiples cortes.

Para la resolución de las instancias se adoptó un criterio de parada consistente en un GAP relativo menor o igual al 1%. Tanto en la Tabla I como en la Tabla II se observa que los valores de GAP reportados se encuentran por debajo de este

umbral, lo que garantiza la calidad y estabilidad de las soluciones alcanzadas

	Benders Sin Múltiples Cortes			Benders Con Múltiples Cortes		
Instancia	# Iteraciones	Tiempo	GAP [%]	# Iteraciones	Tiempo	GAP [%]
1	3	14,750	0,0173 %	2	11,621	0,017 %
2	3	24,485	0,897 %	2	18,491	0,664 %
3	11	100,731	0,966 %	6	63,062	0,935 %
4	21	260,434	0,80 %	10	149,465	0,993 %
5	23	364,216	0,731 %	9	294,868	0,814 %
6	16	495,529	0,806 %	11	339,864	0,834 %
7	27	1034,586	0,652 %	15	598,666	0,881 %
8	30	1885,840	0,338 %	10	769,763	0,945 %
9	16	2266,540	0,951 %	11	776,342	0,651 %
10	31	4500,230	0,868 %	12	937,761	0,970 %

TABLE II. TIEMPOS DE RESOLUCIÓN CON MÚLTIPLES SEGUIDORES

Puede apreciarse que el tiempo de resolución de cada instancia se incrementa a medida que el tamaño del modelo crece. Este aumento está directamente relacionado con el incremento en el número de puntos de muestreo y potenciales zonas de manejo rectangulares, lo que hace que el modelo se vuelva más complejo. En particular, a medida que el tamaño del modelo aumenta, el modelo requiere más recursos computacionales, tanto en términos de tiempo como de iteraciones. Al comparar los tiempos de resolución del algoritmo de Benders, se aprecia una mejora notable en los tiempos de ejecución cuando se utilizan múltiples cortes. La diferencia más significativa se observa en la instancia de mayor tamaño. Estos resultados indican que, en general, a medida que el tamaño del modelo se expande, la eficiencia del algoritmo con múltiples cortes se vuelve más evidente, logrando tiempos de resolución cada vez más favorables en comparación con el modelo sin múltiples cortes. Algo similar ocurre en el problema con un solo seguidor, pero con una disminución algo menos significativa que lo observado en la tabla anterior.

La Tabla III presenta los valores del Valor Esperado de la Información Perfecta (EVPI) para las 10 instancias consideradas en el problema binivel estocástico con múltiples seguidores. El EVPI se expresa tanto en valores absolutos como en términos relativos, lo que permite una interpretación clara de su magnitud en cada instancia para la diferencia entre el valor óptimo del modelo estocástico binivel y el valor óptimo del modelo wait-and-see que representa el valor esperado de la utilidad con la información perfecta de cada escenario (por separado).

Instancia	EVPI	EVPI [%]
1	1.486.900	9,229 %
2	1.903.200	10,589 %
3	3.522.100	12,701 %
4	4.133.000	13,621 %
5	5.024.900	13,862 %
6	4.971.600	12,095 %
7	4.910.600	10,97 %
8	7.966.400	15,134 %
9	8.528.600	15,087 %
10	10.822.800	17,614 %

TABLE III. VALORES DEL VALOR DE LA INFORMACIÓN PERFECTA

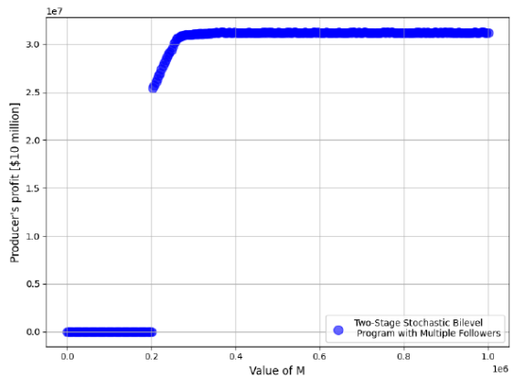
Se observa que el valor del EVPI esencialmente aumenta conforme incrementa el tamaño del problema. Este incremento progresivo del EVPI sugiere que la incertidumbre juega un papel crucial en las soluciones óptimas alcanzadas por el modelo de optimización estocástico binivel, lo que resalta el valor de contar con información perfecta de los antecedentes bajo incertidumbre (precios, demandas y rendimientos). Esto es, el valor del EVPI indica que la falta de información perfecta afecta significativamente el rendimiento de las soluciones obtenidas por un modelo determinista comparado con el estocástico.

Por último, precisar que para resolver el modelo binivel utilizando el algoritmo de Benders, fue necesario aplicar las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker que reformula el subproblema en uno de un solo nivel. Esto a su vez se acompaña del enfoque Big-M que permite expresarle en término lineales. Sin embargo, la aplicación de esta última estrategia requiere la elección de un valor adecuado para este parámetro, ya que una elección arbitraria puede conducir a soluciones no óptimas. Ello se dedujo de manera analítica y la siguiente gráfica permite visualizar lo señalado ante diferentes valores del parámetro M.

En términos de escalabilidad, el método propuesto muestra un buen desempeño en instancias pequeñas y medianas, pero a medida que crece el número de escenarios y variables, los tiempos de resolución aumentan de forma significativa. Esto evidencia que la escalabilidad del enfoque depende fuertemente del tamaño del problema, por lo que para aplicaciones de gran escala sería recomendable incorporar técnicas adicionales.

Respecto a las limitaciones, el enfoque depende de parámetros y datos agronómicos confiables, cuya disponibilidad puede ser restringida en contextos reales, lo que condiciona la aplicabilidad directa del modelo en ciertos entornos productivos.

Fig. 1 Valor óptimo del modelo para diferentes valores de M



AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente financiada por la Dirección General de Investigación, Innovación y Emprendimiento (Proyecto PIM2021-99) y por la Dirección de Postgrado y Programas (Beca de Magíster USM), ambas de la Universidad Técnica Federico Santa María.

REFERENCIAS

[1] J. Bard. Practical Bilevel Optimization: algorithms and applications. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 1st ed., 1998.

[2] N. M. Cid-Garcia, V. Albornoz, Y. A. Rios-Solis, and R. Ortega. “Rectangular shape management zone delineation using integer linear programming”. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 93, pp.1–9, 2013.

[3] G.K. Saharidis and M.G. Ierapetritou. Resolution method for mixed integer bi-level linear problems based on decomposition technique. Journal of Global Optimization, vol.44, pp.29–51, 2009.

[4] C.F. Villanueva. Esquema de descomposición de Benders para la resolución de un modelo de optimización binivel con múltiples seguidores en un problema de planificación y programación de cosecha. Manuscrito de la Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial, Universidad Técnica Federico Santa María, 2025.

Session N°4 – Track N°2

Scheduling

Chair: Morillo-Torres, D. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
Place: G6-055
Time: 17:30 – 18:45

Scheduling Heuristics in the Concrete Industry

Time: 17:30 – 17:45
Authors:

- Miranda, C. *(Universidad de Chile)*
- Cleveland, P. *(Instituto Politécnico de Setúbal)*
- Ríos, S. *(Universidad de Chile)*

Evaluación de un Enfoque Heurístico Conjunto para Minimizar la Tardanza Total del Proceso de Preparación de Pedidos Bajo Condiciones de la Logística Inversa en un Ambiente Simulado

Time: 17:50 – 18:05
Authors:

- Mendoza-Hernandez, M. *(Universidad del Atlántico)*
- Mendoza-Casseres, D. *(Universidad del Atlántico)*

Scheduling Problems in Emerging Manufacturing-as-a-Service Platforms

Time: 18:10 – 18:25
Authors:

- Duran-Mateluna, C. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Borodin, V. *(IMT Atlantique)*
- Thevenin, S. *(IMT Atlantique)*
- Dolgui, A. *(IMT Atlantique)*

A New Robustness Measure Based on Entropy for Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Durations Under Uncertainty

Time: 18:30 – 18:45
Authors:

- Gutiérrez-Padilla, M. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Morillo-Torres, D. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
- Willmer-Escobar, J. *(Universidad del Valle)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Scheduling heuristics in the concrete industry

Catalina Miranda P.
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Chile
Santiago, Chile
catmiranda@ug.uchile.cl

Pablo Cleveland O.
DICE Lab
Instituto Politécnico de Setúbal
Setúbal, Portugal
0000-0001-7463-5496

Sebastián Ríos P.
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Chile
Santiago, Chile
0000-0001-5557-6187

***Abstract*—Optimizing scheduling to minimize lateness in the concrete industry involves a high computational cost due to the NP-hard nature of the problem, making its application difficult when a real-time response is required. This paper proposes a heuristic approach as an efficient and more practical implementation to solve the problem. For the experimentation, 80 instances were used, derived from a dataset with information that simulates one week of concrete orders. Four heuristics, two constructive and two improvement-based, are implemented in Python. Each heuristic uses different criteria for task ordering and machine assignment, and all are integrated within a single Greedy-based metaheuristic. Additionally, a random heuristic and an exact optimization model are developed and implemented, serving as upper and lower reference bounds, respectively. The results show that the GRASP heuristic maintains an average gap of just 8.3% from the optimal solution, offering an average improvement of 2968.8% compared to the baseline, returning a good quality schedule. Additionally, despite of having a greater runtime than the construction and improvement heuristics, GRASP's execution time represents only about 10,43% of the time needed by the optimization model to run. These findings validate heuristic approaches as effective for balancing solution quality and computational efficiency, making them suitable for practical, real-time applications in the concrete industry.**

***Index Terms*—heuristics, scheduling optimization, NP-hard problem, metaheuristics, GRASP, concrete industry**

We thank the organizations that contributed to the funding of this work: Magíster en Gestión de Operaciones, Universidad de Chile and ANID (CONICYT-PFCHA/Doctorado Nacional/2019-21190971)

Evaluación de un enfoque heurístico conjunto para minimizar la tardanza total del proceso de preparación de pedidos bajo condiciones de la logística inversa en un ambiente simulado

Maria Alejandra Mendoza-Hernandez
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Atlántico
Barranquilla, Colombia
mamendozahernandez@mail.uniatlantico.edu.co

Daniel Mendoza-Casseres
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Atlántico
Barranquilla, Colombia
danielmendoza@mail.uniatlantico.edu.co

***Resumen*:**

La creciente complejidad en la preparación de pedidos, acentuada por la integración de la logística inversa en almacenes, ha requerido de nuevas estrategias para mejorar la eficiencia operativa. Este proyecto tiene como objetivo evaluar un enfoque heurístico conjunto que permita resolver de forma simultánea los subproblemas de procesamiento por lotes, asignación, secuenciación y enrutamiento, considerando la inclusión de productos devueltos al sistema de preparación de pedidos. Se busca analizar el impacto de la logística inversa sobre indicadores clave como la tardanza total, el tiempo de recorrido y la utilización de recursos del almacén a través del uso de metaheurísticas y simulación de eventos discretos utilizando el software FlexSim. Los resultados preliminares muestran que resolver el problema conjunto con tres preparadores sin emplear logística inversa reduce la tardanza en alrededor del 50%. El modelo propuesto incorpora restricciones operativas reales para observar el efecto en los resultados cuando se incluye la logística inversa, lo que es especialmente útil en contextos de alta variabilidad como el comercio electrónico.

Palabras clave: Preparación de Pedidos, Logística Inversa, Metaheurísticas, Tardanza, Simulación.

I. Introducción

En la actualidad, los almacenes enfrentan el desafío de gestionar no solo pedidos nuevos, sino también una creciente cantidad de devoluciones generadas por el comercio electrónico. La logística inversa introduce flujos de retorno que transforman las rutas de picking tradicionales en rutas mixtas, obligando a incluir zonas de inspección, reacondicionamiento o clasificación en la operación. Esta situación complejiza la planificación de rutas, la asignación de tareas y la secuenciación de pedidos. A partir de estas condiciones, este proyecto propone evaluar un enfoque heurístico conjunto en un ambiente simulado, que integre técnicas de optimización con simulación de eventos discretos, con el fin de minimizar la tardanza total del sistema y mejorar el uso eficiente de los recursos del almacén.

II. MARCO TEÓRICO

La preparación de pedidos ha sido extensamente abordada desde la óptica de la optimización mediante heurísticas y metaheurísticas. los almacenes e-commerce enfrentan altos volúmenes de devoluciones y pedidos pequeños.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

En el 2017, se propone un modelo que soluciona conjuntamente los subproblemas de procesamiento por lotes, asignación, secuenciación y enrutamiento donde múltiples recolectores recogen pedidos con fechas de entrega específicas [1]. El enfoque conjunto mejora significativamente la eficiencia logística, con soluciones de alta calidad incluso en grandes instancias.

Sin embargo, el problema conjunto no involucra la logística inversa, particularmente en el tratamiento de devoluciones de productos por defectos, exceso de inventario o causas estacionales, introduce flujos de materiales no planificados que afectan de forma considerable la dinámica operacional de los almacenes. Estas devoluciones requieren procesos adicionales como inspección, reacondicionamiento y reubicación, lo que altera la planificación tradicional de rutas de picking y la asignación eficiente de tareas a los recolectores.

Varios estudios han tratado el proceso de preparación de pedidos bajo condiciones de la logística inversa:

- Chang, P.-C., & Gupta, S. (2024) plantean un enfoque que integra metaheurísticas (para optimizar rutas y batching) con simulación (para evaluar el desempeño real del sistema), reconociendo que estas son potentes para encontrar soluciones cercanas al óptimo, pero no modelan la variabilidad y dinámica real del almacén. La simulación discreta permite observar métricas clave como nivel de servicio, tiempos de respuesta, utilización de recursos e impactos de congestión o cuellos de Botella [2].

- Wruck, S., Vis, I. F. A., & Boter, J. (2013) señalan que, Incluir devoluciones en el proceso de preparación de pedidos bajo un enfoque heurístico conjunto y modelado en un ambiente simulado, no sólo es relevante por el crecimiento del e-commerce, sino que permite mejorar indicadores clave del almacén como la utilización de recursos, la gestión del inventario, la distancia recorrida y la reducción de la tardanza total [3].

Ambos estudios respaldan la necesidad de combinar simulación con metaheurísticas para enfrentar los nuevos retos logísticos, especialmente en almacenes que gestionan devoluciones de forma frecuente. Este respaldo, refuerza la decisión metodológica de integrar un enfoque heurístico, conjunto en un entorno simulado, con el objetivo de minimizar la tardanza total y mejorar el uso de recursos.

Bajo estas condiciones, se requiere evaluar un enfoque heurístico conjunto capaz de resolver el subproblema de procesamiento por lotes, considerando las nuevas restricciones operativas impuestas por la logística inversa. Se plantea la necesidad de analizar, a través de simulación-optimización, si este enfoque permite minimizar la tardanza total del sistema y mejorar la utilización de los recursos del almacén.

Por tanto, en este proyecto se propone, evaluar un enfoque heurístico conjunto que resuelva simultáneamente los subproblemas de, procesamiento por lotes, la asignación y secuenciación de lotes de pedidos, y el enrutamiento del selector, considerando específicamente la integración de rutas para devoluciones.

III. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo con modelado en ambiente simulado. Se desarrollará una heurística basada en el enfoque propuesto por Scholz, Schubert y Wäscher (2017), adaptada para incluir el manejo de devoluciones. El almacén será modelado en FlexSim, donde se programará el algoritmo en FlexScript. El sistema simulará flujos mixtos (pedidos nuevos y devoluciones), rutas mixtas, restricciones de capacidad y tiempos de servicio. Se evaluarán variables como la tardanza total, distancia recorrida y utilización de recursos, comparando los resultados obtenidos bajo distintas configuraciones heurísticas.

.

IV. CONCLUSIONES

La inclusión de devoluciones en el sistema de preparación de pedidos incrementa la complejidad operativa, especialmente en el enrutamiento de recolectores. La simulación combinada con metaheurísticas permite modelar tanto la variabilidad del entorno como la búsqueda de soluciones eficientes. El enfoque heurístico conjunto permite abordar simultáneamente los subproblemas críticos del sistema (batching, asignación, secuenciación y routing), logrando una mejora integral en la eficiencia del almacén. Se espera que el modelo evaluado contribuya a la toma de decisiones logísticas en centros de distribución que operan bajo condiciones de alta incertidumbre y retorno de productos.

Referencias

[1] Scholz, Schubert & Wäscher (2017). "Order picking with multiple pickers and due dates – simultaneous solution of Order Batching, Batch Assignment and Sequencing, and Picker Routing Problems." EJOR, 263(2), 461–478

[2] Chang, P.-C., & Gupta, S. (2024) “Combination of heuristic approach and simulation for route evaluation in warehouse order picking”, Investigación e Innovación en Ingenierías, 12(2), 1–20.

[3] Wruck, S., Vis, I. F. A., & Boter, J. (2013). Time-restricted batching models and solution approaches for integrated forward and return product flow handling in warehouses. The Journal of the Operational Research Society, 64(10), 1505–1516. https://doi.org/10.1057/jors.2012.137

Scheduling Problems in Emerging Manufacturing-as-a-Service Platforms

1st Cristian Duran-Mateluna
Industrial Engineering Department
Universidad de Santiago
Santiago, Chile
cristian.duranm@usach.cl

2nd Valeria Borodin
LS2N-CNRS,
IMT Atlantique
Nantes, France
valeria.borodin@imt-atlantique.fr

3rd Simon Thevenin
LS2N-CNRS,
IMT Atlantique
Nantes, France
simon.thevenin@imt-atlantique.fr

4th Alexandre Dolgui
LS2N-CNRS,
IMT Atlantique
Nantes, France
alexandre.dolgui@imt-atlantique.fr

***Abstract*—Manufacturing-as-a-Service (MaaS) is an emerging production paradigm offering flexibility and scalability via distributed, servitized manufacturing resources. However, it poses novel challenges in scheduling tasks over heterogeneous providers with dynamic service orders and conflicting interests of the stakeholders. This paper formulates a static and centralized MaaS scheduling problem using Mixed-Integer Linear Programming (MILP) and Constraint Programming (CP) models, incorporating task-machine eligibility and tardiness objectives. Computational experiments compare the performance of both formulations across randomly generated instances. Results show that CP outperforms MILP in scalability while maintaining solution quality. Future work includes scalable metaheuristics, online decision models, and negotiation mechanisms for decentralized coordination.**

***Index Terms*—Manufacturing-as-a-Service, Scheduling Problems, Bi-objective Optimization, Constraint Programming.**

I. Introduction

In an increasingly volatile global environment, traditional manufacturing models face significant limitations. Supply chains are regularly disrupted by geopolitical instability, environmental catastrophes, labor shortages, and other external unforeseen events. These disruptions expose the fragility of centralized, capital-intensive production strategies, prompting industries to explore more resilient, distributed, and flexible models [1]. One of the most promising paradigms in this context is *Manufacturing-as-a-Service (MaaS)*, an innovative distributed production system with the potential to reshape the way in which companies can access and utilize manufacturing capabilities [2]. MaaS relies on the servitization of manufacturing resources enabled by Industry 4.0 technologies such as cloud computing, IoT-enabled machines, digital twins, and real-time data analytics [3], [4]. There is currently great interest in developing and adopting this new approach, for instance, the European Commission has several research and innovation projects with universities and major industrial partners[1].

[1]https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-cl4-2024-twin-transition-01-03

MaaS offers substantial advantages, such as flexibility, scalability, resource sharing, and reduced investment in fixed assets. However, the shift to MaaS significantly increases operational complexity compared to traditional manufacturing, introducing several challenges [5]–[7]. Specifically, MaaS must manage *distributed and heterogeneous resources*, since providers retain control over their own production assets; handle *dynamic and uncertain customer demands*, with real-time variations in technical, temporal, and quality requirements; address *multiple conflicting objectives*, balancing customer demands for low costs and rapid service, providers' goals of resource utilization and profitability, and the platform's objectives related to overall system efficiency and fairness; and navigate *volatile market conditions*, influencing pricing and contract negotiations. These complexities create three main interrelated decision-making perspectives within MaaS systems: (1) customers, who prioritize timely delivery and cost-efficiency; (2) providers, who seek optimal use of their resources and profitability; and (3) the platform operator, who coordinates tasks and resources to achieve overall performance, efficiency, and equitable outcomes [8]. Mathematically, the interaction of these perspectives translates into two coupled optimization problems: a *matchmaking problem*, where the platform identifies eligible providers for each task based on technical and complementary criteria (e.g., sustainability, resilience); and a *scheduling problem*, which assigns tasks to specific providers, determining their sequence and timing to optimize metrics like tardiness, resource utilization, and cost-effectiveness.

For matchmaking problems there are different solution approaches based on ontologies and multi-criteria decision making processes [1]. On the other hand, scheduling problems are mainly solved by exact methods, such as *Linear Programming* and *Constraint Programming*, or by metaheuristic approximation methods [9]. The latter become essential to develop the full potential of MaaS, because even if we can identify potential good candidates of service providers, the

negotiation aspects and the operational burdens of the suppliers are not considered in detail in the matchmaking process, making it difficult to guarantee the timely delivery of services.

This work addresses these new scheduling problems for the MaaS framework. These kinds of scheduling problems are NP-hard in the strong sense [10], even under simplified conditions, indicating that exact algorithms become computationally infeasible for real industrial instances, highlighting the need for innovative and scalable mathematical models and solution algorithms. Despite a wealth of research in related areas such as cloud manufacturing and shared production systems, literature addressing specifically MaaS and scheduling problems remains scarce [2], [9], [11], [12]. We present two mathematical formulations for a static and centralized MaaS scheduling problem. Based on [13], we first generalize a MILP formulation to a bi-objective problem, and then also present a CP formulation. We have conducted a performance comparison of both formulations on randomly generated instances.

II. Problem formalization

Given a set of n service orders (i.e., tasks) $j \in \mathcal{J}$ and a set of m resource providers (i.e., machines) $i \in \mathcal{M}$, a MaaS scheduling problem can be defined as $Rm|q_{ij}, \theta| \sum w_j T_j$ [13], where Rm indicates unrelated parallel machines; q_{ij} the delivery times; θ a minimum level of task-machine eligibility; and $\sum w_j T_j$ the objective of total weighted tardiness, where $T_j = \max\{C_j - d_j, 0\}$ and C_j is the completion time defined as the time by which a task reaches the customer. It is assumed that all tasks are available at time zero, each task needs to be processed by one and only one machine without interruption, and each machine can handle at most one task at a time. The delivery times occur immediately after completing the tasks on the respective machine. Consequently, the MaaS platform coordinates the assignment and sequence of tasks to the most qualified machines. The formulation includes binary assignment variables y_{ij} of task j to machine i, precedence variables z_{jk} between tasks j and k, and variables s_j to denote the start time of task j.

In relation to task-machine eligibility introduced in [13], they consider eligibility scores $e_{ij} \in [0, 1]$, and propose a constraint of minimal eligibility level θ for each task individually or on average of tasks. However, eligibility may also be an objective to maximize. Thus, using the same variables, a general bi-objective problem is presented below. Constraints (3) stipulate that each task can be assigned to at most one machine. Disjunctive constraints (4) and (5) manage the precedence relationship between tasks on machines. Constant H is an upper bound on task start times and can be computed by: $H = \max_{i \in \mathcal{M}} \Big\{ \sum_{j \in \mathcal{J}} p_{ij} - \min_{j \in \mathcal{J}} p_{ij} \Big\}$. Task completion times and tardiness values are computed according to (6)-(8). In (9) and (10), the functions $f(T_j)$ and $g(e_{ij})$ represent the tardiness and eligibility measures that are minimized and maximized in (1) and (2), respectively.

$$\min \ \mathcal{T} \tag{1}$$
$$\max \ \mathcal{E} \tag{2}$$
$$\text{s.t.} \ \sum_{i \in \mathcal{M}} y_{ij} = 1 \qquad j \in \mathcal{J} \tag{3}$$
$$s_k \geq s_j + p_{ij} - H(3 - y_{ik} - y_{ij} - z_{jk}) \qquad j,k \in \mathcal{J},\ j \neq k,\ i \in \mathcal{M} \tag{4}$$
$$s_j \geq s_k + p_{ik} - H(2 - y_{ik} - y_{ij} + z_{jk}) \qquad j,k \in \mathcal{J},\ j \neq k,\ i \in \mathcal{M}, \tag{5}$$
$$C_j \geq s_j + (p_{ij} + q_{ij}) y_{ij} \qquad i \in \mathcal{M},\ j \in \mathcal{J} \tag{6}$$
$$T_j \geq C_j - d_j \qquad j \in \mathcal{J} \tag{7}$$
$$T_j, C_j \geq 0 \qquad j \in \mathcal{J} \tag{8}$$
$$\mathcal{T} \geq f(T_j) \tag{9}$$
$$\mathcal{E} \leq g(e_{ij}) \tag{10}$$
$$y_{ij}, z_{jk} \in \{0, 1\} \qquad i \in \mathcal{M},\ j,k \in \mathcal{J}$$

Tardiness and eligibility measures can be different mathematical expressions of the individual delays T_j and the eligibility scores e_{ij}, the main measures are presented in Table 2. For both objectives, measures can be considered globally or individually by task. In the former, more flexibility is allowed and a greater collaboration between the actors is considered, which is more natural in a type of MaaS platform that manages only its own equipment or a consortium of companies. In the second, it considers all tasks independently, which is more appropriate in the context of a MaaS platform with different industries and competing actors. Other performance indicators can be included, such as those presented in [13].

TABLE I
Main objective measure functions

Function	Measure	Description
$f(T_j)$	$\sum_{j \in \mathcal{J}} w_j T_j$	Total Weighted Tardiness
	$T_j \quad j \in \mathcal{J}$	Maximal Tardiness
$g(e_{ij})$	$\sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{J}} e_{ij} y_{ij}$	Total Eligibility
	$\sum_{i \in \mathcal{M}} e_{ij} y_{ij} \quad j \in \mathcal{J}$	Minimal Eligibility

Another important approach in the literature for modeling scheduling problems is CP. This approach, in general, is much more efficient for integer variable problems as in this case. In this context, interval variables are considered which are defined as a finite domain of solutions, which for scheduling problems are defined directly with a value that determines the start, length and end of the respective interval. For our problems, let x_{ij} be an optional *interval variable* of executing job j on machine i with duration of p_{ij}. Then considering the problem same measures of [13] with the lexicographic approach using a given θ value, the problem can be formulated as follows. This formulation uses the same objective function of total weighted tardiness. Constraints (11) define the single-assignments in the same way as (3). Similarly, for (12) of non-overlapping and disjunctive constraints (4) and (5). Constraints (13) guarantee the minimal eligibility level θ for each task, and the task tardiness values are directly obtained in (14).

$$\min \sum_{j \in \mathcal{J}} w_j T_j$$

$$\text{s.t. } Alternative(x_{1j}, x_{2j}, ..., x_{mj}) \quad j \in \mathcal{J} \quad (11)$$

$$noOverlap(x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{in}) \quad i \in \mathcal{M} \quad (12)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{M}} e_{ij} \cdot presenceOf(x_{ij}) \geq \theta \quad j \in \mathcal{J} \quad (13)$$

$$T_j \geq endOF(x_{ij}) + presenceOf(x_{ij}) \cdot q_{ij} - d_j \quad j \in \mathcal{J} \quad (14)$$

$$T_j \geq 0 \quad j \in \mathcal{J}$$

III. Computational experiments

Considering the same instance generation scheme used in [13], Table II reports the aggregate results of the MILP and CP models across problem instances with increasing size. For a given $\theta = 0.25$, the experiments vary the number of tasks n (12, 18, 24) and machines m (2, 4, 6), and compare both models in terms of total tardiness ($\mathcal{T}$), optimality gap (gap), runtime (t_{run}), and CPU time (t_{cpu}). The indicators are presented as the average over 15 instances per pair of parameters. All experiments are conducted on an Apple M3 Pro computer with 4.05 GHz and 18 GB RAM. The models are coded in the C++ language using CPLEX and CP Optimizer of IBM as the optimization solvers with a time limit (TL) of 1,800 seconds.

For instances with $n = 12$, both MILP and CP models consistently find optimal solutions with zero gap and similar times. For $n = 18$, the MILP model begins to show limitations. While it still finds optimal solutions in some cases (e.g., $m = 6$), it reaches high optimality gaps (22–80%) or time limits in others. In contrast, the CP model delivers feasible solutions with small or zero gaps, and with much shorter times than MILP. For $n = 24$, the MILP model fails to produce high-quality solutions, with gaps reaching 100% and runtimes hitting the time limit in all configurations. The CP model continues to outperform MILP, achieving much smaller gaps (20–84%) and generally lower runtimes, although performance degrades as problem size increases. Notably, CP yields the best-known solution values in all large instances in shorter times. In contrast, MILP is able to get better lower bounds. Overall, for these small-scale instances, the CP model exhibits superior performance as problem complexity increases.

TABLE II
Aggregate results of MILP and CP models

Instances		MILP				CP			
n	m	$\mathcal{T}$	gap	$t_{run}[s]$	$t_{cpu}[s]$	$\mathcal{T}$	gap	$t_{run}[s]$	$t_{cpu}[s]$
12	2	229	0%	16	151	229	0%	**7**	68
	4	182	0%	**0.4**	6	182	0%	1	15
	6	197	0%	**0.1**	3	197	0%	0.8	11
18	2	349	80%	TL	17071	349	**0%**	**112**	957
	4	**246**	22%	1215	11973	255	**6%**	**393**	3239
	6	248	0%	211	2075	248	**0%**	**18**	158
24	2	435	100%	TL	16125	**429**	**20%**	**1060**	8926
	4	327	**81%**	TL	17688	**325**	84%	**1760**	14740
	6	309	**49%**	TL	17440	**308**	59%	TL	13086

IV. Conclusion

Although both MILP and CP models yield exact solutions, their practical application is limited by computational time for large industrial instances. To overcome these scalability issues, it is necessary to develop metaheuristic solution methods that efficiently generate high-quality schedules within reasonable computational times. Moreover, the context of MaaS entails different perspectives and a hierarchy of decision-makers, along with dynamic, real-time aspects. Therefore, our main research perspectives are: (i) propose and analyze other MaaS-related optimization criteria; (ii) incorporate operational constraints of providers, such as availability windows; (iii) formulate a decentralized model in which providers can reject proposals; (iv) consider dynamic/online settings with unknown task release times; and (v) include negotiation mechanisms, such as cost configuration and dynamic pricing.

References

[1] F. Schuseil, M. Hertwig, J. Lentes, N. Zimmermann, and K. Hölzle, "A semantic matchmaking approach to empower human decision-making in manufacturing-as-a-service scenarios," *Human Factors in Design, Engineering, and Computing. AHFE (2024)*, vol. 159, p. 106105, 2024.

[2] A. Karamanli, A. Xanthopoulos, A. Gasteratos, and D. Koulouriotis, "A bibliometric and systematic review of manufacturing-as-a-service: Literature insights, challenges, and future trends," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 5, 2025.

[3] S. Bulut, M. Wende, C. Wagner, and R. Anderl, "Impact of manufacturing-as-a-service: Business model adaption for enterprises," *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 1286–1291, 2021.

[4] D. Ivanov, A. Dolgui, and B. Sokolov, "Cloud supply chain: Integrating Industry 4.0 and digital platforms in the "Supply Chain-as-a-Service"," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 160, p. 102676, 2022.

[5] S. Liu, Q. Deng, X. Liu, Q. Luo, F. Li, and C. Jiang, "Dual-service integrated scheduling of manufacturing and logistics for multiple tasks in cloud manufacturing," *Expert Systems with Applications*, vol. 235, p. 121129, 2024.

[6] X. Wang, Y. L. Lin Zhang, and Y. Laili, "An improved deep reinforcement learning-based scheduling approach for dynamic task scheduling in cloud manufacturing," *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 11, pp. 4014–4030, 2024.

[7] T. Zhao, S. Lu, H. Cheng, M. Ren, and X. Liu, "Coordinated production and delivery scheduling for service-oriented manufacturing systems with deterioration effect," *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 20, pp. 7598–7617, 2024.

[8] W. Chen, P. Feng, X. Luo, and L. Nie, "Task-service matching problem for platform-driven manufacturing-as-a-service: A one-leader and multi-follower Stackelberg game with multiple objectives," *Omega*, vol. 129, p. 103157, 2024.

[9] C. O. Ege Duran and B. O'Sullivan, "Planning and scheduling shared manufacturing systems: key characteristics, current developments and future trends," *International Journal of Production Research*, vol. 0, no. 0, pp. 1–33, 2024.

[10] M. Pfund, J. W. Fowler, and J. N. D. G. and, "A survey of algorithms for single and multi-objective unrelated parallel-machine deterministic scheduling problems," *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 21, no. 3, pp. 230–241, 2004.

[11] W. Chen, P. Feng, X. Luo, and L. Nie, "Task-service matching problem for platform-driven manufacturing-as-a-service: A one-leader and multi-follower stackelberg game with multiple objectives," *Omega*, vol. 129, p. 103157, 2024.

[12] M. Hertwig, F. Schuseil, J. Lentes, V. Borodin, C. Duran-Mateluna, A. Dolgui, and S. Thevenin, "Ontology-based matchmaking and scheduling for manufacturing as a service," *Procedia CIRP*, vol. 134, pp. 372–377, 2025, 58th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2025.

[13] C. Duran-Mateluna, V. Borodin, A. Dolgui, and S. Thevenin, "A manufacturing-as-a-service scheduling problem and its tripartite decision perspective," in *11th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control*, 2025.

A New Robustness Measure Based on Entropy for Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Durations Under Uncertainty

1st Maria Victoria Gutiérrez-Padilla
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
maria.gutierrez.p@mail.pucv.cl

2nd Daniel Morillo-Torres
Department of Civil and Industrial Engineering
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Cali, Colombia
daniel.morillo@javerianacali.edu.co

3rd John Willmer Escobar
Department of Accounting and Finance
Universidad del Valle
Cali, Colombia
john.wilmer.escobar@correounivalle.edu.co

4th Germán Paredes-Belmar
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
german.paredes@pucv.cl

***Abstract*—This research addresses the Uncertain Resource-Constrained Project Scheduling Problem (URCPSP), an extension of the well-known RCPSP, one of the most important NP-hard problems in scheduling. The RCPSP consists of the optimal allocation of resources over time to the activities that make up a project. While the RCPSP seeks to minimize project duration subject to precedence constraints and limited resources, the URCPSP introduces a more realistic setting by incorporating uncertainty in activity durations due to unforeseen events. We propose a new robustness metric based on network entropy, nodal tolerance, and nodal importance. The proposed metric is adapted from the concept of electrical systems, using a piecewise linear function for each activity that evaluates the significance of time slacks, considering the extent to which the expected slack of each activity is achieved. This proposal demonstrates that robustness is associated with the intelligent management of activity slacks within a solution, rather than merely with their total accumulated value. Additionally, we propose a general methodology for the robust solution of the URCPSP that incorporates a Genetic Algorithm that seeks to find a baseline schedule capable of absorbing potential disruptions through time slacks. Several tests on a realistically adapted benchmark library have been performed. The results obtained validate the efficiency of the proposed approach and demonstrate that the intelligent distribution of time buffers enhances robustness.**

***Index Terms*—URCPSP; uncertainty; robustness; slack; Genetic Algorithm**

Session N°4 – Track N°3

Waste Management and Recycling

Chair: Dávila-Soria, D. *(Universidad de los Andes)*
Place: G6-056
Time: 17:30 – 18:45

Logística de Recolección y Distribución de Residuos Orgánicos en Ferias Libres de Viña del Mar

Time: 17:30 – 17:45
Authors:

- Arancibia-Rodríguez, C. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Porras-Lobos, S. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Solar-Carvajal, J. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Ubicación de Puntos de Reciclaje Bajo Incertidumbre: Un Enfoque Basado en Comportamiento y Capacidad

Time: 17:50 – 18:05
Authors:

- Méndez-Vogel, G. *(Universidad Andrés Bello)*
- Dávila-Gálvez, S. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Jara-Moroni, P. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Zamorano, J. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Marco de Optimización para la Evaluación de Políticas Públicas de Reciclaje y Diseño de Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado

Time: 18:10 – 18:25
Authors:

- Marín Vélez, V. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
- Becerra Muñoz, P. *(Universidad de Atacama)*

Un Modelo Binivel para la Localización de Contenedores de Recolección de Residuos Textiles

Time: 18:30 – 18:45
Authors:

- Dávila-Soria, D. *(Universidad de los Andes)*
- Aguirre-Lopez, M. *(Universidad Autónoma de Chiapas)*
- Flores-Muñíz, J. *(Universidad Autónoma de Nuevo León)*
- Camacho-Vallejo, J. *(Tecnológico de Monterrey)*

Logística de Recolección y Distribución de Residuos Orgánicos en Ferias Libres de Viña del Mar

Cristóbal Arancibia-Rodríguez
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
cristobal.arancibia.r@mail.pucv.cl

Sofía Porras-Lobos
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
sofia.porras.l@mail.pucv.cl

Joaquín Solar-Carvajal
Programa Ingeniería Civil Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaiso, Chile
joaquin.solar.c@mail.pucv.cl

Germán Paredes-Belmar
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
german.paredes@pucv.cl

Gabriel Gutiérrez-Jarpa
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de *Valparaíso*
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl

***Resumen*— La fracción de residuos orgánicos representa más del 50 % de los residuos sólidos en Chile y, cuando se depositan en rellenos sanitarios, generan metano y otros gases de alto impacto ambiental. Este estudio formula y aplica un modelo de programación lineal entera mixta que coordina, a nivel semanal, la recolección selectiva de residuos vegetales en ferias libres de Viña del Mar, su transformación en tres tipos de compost (cada uno con un lead-time específico) y la distribución de los productos terminados a ocho clientes institucionales. El modelo decide para cada uno de los 20 periodos del horizonte qué ferias visitar, cuánto producir e inventariar de cada tipo de compost y qué rutas de reparto ejecutar, todo ello minimizando el costo total sujeto a las restricciones de maduración del proceso, balance de masas y ruteo de vehículos. Implementado en AMPL y resuelto con CPLEX, los resultados demuestran que es posible desviar la fracción orgánica de las ferias libres hacia el compostaje y proporcionan una base cuantitativa para escalar la iniciativa a otros municipios.**

Palabras Clave— Residuos orgánicos, compost, ferias libres, modelo de programación lineal entera mixta, diseño de redes.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mal manejo de residuos orgánicos constituye un gran problema para nuestra sociedad. En Chile, los residuos orgánicos corresponden al 53,3% de los residuos sólidos que se generan en el país [1]. La principal preocupación surge cuando estos residuos no se manejan adecuadamente y terminan en rellenos sanitarios, donde se descomponen sin oxígeno, lo que genera diversos problemas ambientales, debido principalmente a la generación de gases tóxicos, malos olores y la adquisición de cualidades comburentes y explosivas de los residuos en los rellenos sanitarios, pudiendo causar daños ambientales irreparables [2]. Por otro lado, se provoca un incremento del efecto invernadero, debido a la producción del gas metano, el cual tiene un potencial de calentamiento global mucho mayor que incluso el dióxido de carbono, por lo que contribuye significativamente al cambio climático [3].

Ante este escenario, el compostaje se presenta como una solución sostenible para valorización de residuos orgánicos mediante su transformación en un abono natural rico en nutrientes [4], permitiendo transformar estos desechos en un producto útil para la agricultura y otros sectores. Este proceso se basa en la descomposición aeróbica de materia orgánica por microorganismos, generando un producto estable, higiénico y libre de patógenos, que puede ser utilizado en suelos agrícolas, jardines urbanos o proyectos de reforestación [5]. Existen distintos tipos de sistemas de compostaje, como el sistema Batch, semicontinuo o continuo, cada uno con características particulares en cuanto a duración del proceso y requerimientos operacionales [6]. Esta técnica no solo permite reducir el volumen de residuos enviados a rellenos sanitarios, sino que además mejora la calidad del suelo, fomenta la economía circular y disminuye la huella de carbono del manejo de residuos sólidos urbanos [7].

Dentro del contexto, una fuente significativa de residuos orgánicos urbanos son las ferias libres, las cuales operan periódicamente en distintos sectores y generan grandes volúmenes de desechos, principalmente frutas y verduras no comercializadas durante la jornada. Sin embargo, se estima que solo un 8% de estos residuos son actualmente valorizados [8], desaprovechándose así su potencial como recurso útil

para procesos como el compostaje, la generación de biogás o el uso como alimento animal.

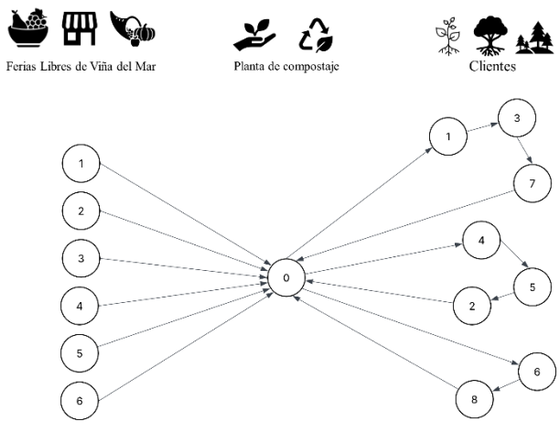


Fig 1. Ejemplo de diseño de red para el modelo propuesto.

Este estudio se centra en el diseño de una red logística integrada que articula la recolección de residuos orgánicos generados en ferias libres de Viña del Mar, su transformación en compost en una planta y la posterior distribución del producto a distintos clientes. El objetivo principal es desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta (PLEM) que minimice el costo total del sistema, considerando el proceso de recolección, transporte, producción y distribución hacia los clientes finales. Para ello, se considera almacenamiento de compostaje, restricciones operacionales, lead-time de producción de los diferentes tipos de compostaje y capacidad vehicular. En la Fig. 1 se presenta un ejemplo del diseño de red propuesto, que muestra en una primera etapa la asignación de las ferias libres para recolección y, posteriormente, el ruteo del camión hacia los clientes finales. El caso ejemplificado corresponde a un ejemplo de ruta factible dentro del horizonte de planificación.

II. METODOLOGÍA Y MODELO PROPUESTO

Para abordar este problema descrito anteriormente, se siguió una metodología compuesta por los siguientes pasos:

1. Levantamiento de información: Recopilar datos sobre la localización de ferias libres en la ciudad de Viña del Mar desde la página web de la Asociación de Ferias Libres de Chile (ASOF) [9]. Localización de planta de compostaje en zona periférica de Viña del Mar, localización de potenciales clientes en las ciudades de Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana.

También se estimaron parámetros del sistema: (i) Distancias entre clientes y planta de compostaje utilizando distancia de Manhattan con la ruta más corta entregada por Google Maps. (ii) Cantidad de residuos orgánicos generados por cada feria utilizando la información disponible desde la web de la Asociación de Ferias Libres de Chile (ASOF) [9] en donde muestran la cantidad de puestos que tiene cada una de las ferias y un promedio del parámetro de generación de residuos orgánicos generados por puesto en Viña del Mar [10]. (iii) El rendimiento por cada kilogramo de residuo orgánico depende en gran medida del tipo de insumo inicial y de la tecnología utilizada en el proceso de transformación. Inicialmente se considera un rendimiento transversal del 60%. (iv) Otros parámetros como lead-time de producción costos de producción e inventario y demanda fueron aleatorizados inicialmente con la finalidad de probar el funcionamiento del modelo.

2. Formulación del modelo: Desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta que permita minimizar los costos totales del sistema.

Las variables de decisión están asociadas a: si una feria específica es visitada en un periodo dado, cantidad de compost que se produce en dicho horizonte temporal, identificación de las rutas de distribución, cantidad transportada después de atender un cliente en un periodo y el inventario de compost mantenido al cierre de cada periodo.

La función objetivo busca minimizar el costo total del sistema: costos de recolección de residuos desde las ferias, costos de producción de compost, costos de transporte asociados a las rutas de distribución y costos de almacenamiento derivados del inventario.

Las restricciones del modelo aseguran la coherencia física y operativa del sistema. Se establece, en primer lugar, el equilibrio entre residuos recolectados y compost producido, respetando el rendimiento del proceso. Asimismo, se impone que la demanda de los clientes se satisfaga en cada periodo, considerando tanto la producción como los inventarios disponibles. El ruteo del camión se controla mediante condiciones de conectividad y balance de flujo, garantizando que cada cliente sea visitado y que las rutas conformen ciclos cerrados sin subtours.

Adicionalmente, el modelo incorpora restricciones que controlan la capacidad máxima de transporte del camión y aseguran que la carga transportada en cada nodo sea suficiente para cubrir la demanda correspondiente. También se fijan condiciones iniciales de inventario y transporte en cero, junto con la definición de la naturaleza de las variables de decisión, asegurando así la validez matemática del modelo y la viabilidad práctica de las soluciones.

3. Validación del modelo: Generar instancias de prueba utilizando datos propuestos en el levantamiento de información para validar el modelo presentado y determinar el tamaño máximo de instancias de resolución eficiente.

III. RESULTADOS PRELIMINARES

Se probó el modelo con una instancia basada en la ciudad de Viña del Mar, considerando: 13 ferias libres de Viña del Mar (según lo reportado por la ASOF) generadoras de residuos orgánicos, 1 planta de compostaje ubicada en la periferia de la ciudad, 8 clientes potenciales ubicados entre las ciudades de Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana, y 21

periodos de planificación (periodo 0 sin decisiones, ya que está reservado para definir estado inicial de la red). El modelo fue programado en AMPL utilizando el solver CPLEX 22.1.2. Tras explorar un árbol de *Branch and Bound* de 108 M de nodos) y resolver 291 M de iteraciones del método simplex, el algoritmo encontró un plan cuyo costo es $ 29,86 M y está, como máximo, a $ 14,5 k (0,05 %) del óptimo teórico.

A la luz de los veinte periodos evaluados, el modelo muestra un patrón consistente: en cada semana identifica el subconjunto mínimo de ferias libres necesario para abastecer la demanda, determina volúmenes de producción ajustados casi exactamente a los requerimientos y diseña rutas de entrega de costo mínimo que respetan la capacidad del vehículo y los lead-times de maduración.

Para ilustrar lo anterior, se muestra como ejemplo el resultado obtenido en el periodo 14:

1. Ferias a Visitar: Feria 15 Norte, Feria Los Almendros, Feria Paradero 12 Achupallas, Feria Quinto Sector Gómez Carreño, Feria Tercer Sector Gómez Carreño.
2. Cantidades a producir. Sistema Batch: 18 [kg], Sistema Semicontinuo: 2368 [kg], Sistema Continuo: 2522 [kg].
3. Cantidades a inventariar. Sistema Batch: 2 [kg], Sistema Semicontinuo: 0 [kg], Sistema Continuo: 0 [kg].
4. Tours del periodo. Tour 1: Planta, Cliente 1, Cliente 3, Cliente 7, Planta; Tour 2: Planta, Cliente 4, Cliente 5, Cliente 2, Planta; Tour 3: Planta, Cliente 6, Cliente 8, Planta.

La consecuencia operativa más significativa que se visualiza es la baja acumulación de existencias. Ello revela que los altos costos unitarios de inventario incorporados a la función objetivo incentivan una estrategia de rotación rápida, producir y despachar, antes que a una basada en mantener stock de seguridad.

Asimismo, la producción limitada de compost bajo el sistema Batch en aquellos periodos cuyo tiempo de maduración desborda el horizonte de planificación responde únicamente al excedente de biomasa que permanece tras satisfacer las demandas de los sistemas Continuo y Semicontinuo. Gracias a su menor costo unitario, el modelo emplea este tipo de compost como variable de ajuste para absorber dicho exceso y, con ello, reducir al mínimo el costo de producción.

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El modelo desarrollado integra, en un único marco matemático, la recolección de residuos orgánicos desde ferias libres, la transformación de dichos residuos en tres tipos de compost con lead-time diferenciados y la distribución posterior a clientes institucionales. La instancia aplicada a un horizonte de 21 semanas demostró que el enfoque propuesto es viable operativamente y competitivo en costos.

Como línea futura de investigación se propone implementar el modelo en un caso operativo real, contrastar empíricamente sus resultados y, a partir de dicha validación, perfeccionarlo para ajustarlo con mayor rigor a las particularidades del problema.

En este proceso deberán recalibrarse los parámetros de demanda efectiva, costos de inventario, de producción, lead-times y eficiencias diferenciadas por tipo de compost, con datos observados, de modo que la planificación entregada refleje con mayor fidelidad la dinámica productiva como su impacto económico.

REFERENCIAS

[1] AdapChile, *Antecedentes del manejo y gestión de residuos en Chile*, Santiago, Chile, 2016.
[2] T. H. Christensen, *Solid Waste Technology and Management*, 2 Vols., 2011.
[3] IPCC, *Quinto Informe de Evaluación: Cambio Climático*, 2013.
[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *On-farm Composting Methods*, Capítulo 3: Large-scale composting, 2003. Disponible en: https://www.fao.org/4/y5104e/y5104e07.htm
[5] Kalamdhad, A. S., et al., "Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves," *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 24, pp. 6442–6450, 2009.
[6] Páez, O., "Sistemas de compostaje y su clasificación: Una propuesta," *Opanatura*, sep. 2021. Disponible en: https://opanatura.com/sistemas-de-compostaje-y-su-clasificacion/
[7] Xiao, Y., et al., "Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation and maturation of organic municipal solid waste," *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 20, pp. 4807–4813, 2009.
[8] C. González, “Cada feria libre podría recibir 45 millones de pesos por reutilización de residuos orgánicos según ASOF,” 2017. [En línea]. Disponible en: https://asof.cl/cada-feria-libre-podria-recibir-45-millones-de-pesos-por-reutilizacion-de-residuos-organicos-segun-asof/
[9] Asociación de Ferias Libres de Chile (ASOF). (s. f.). *Ubica ferias*. ASOF. https://asof.cl/ubicaferias/
[10] Szanto, M., Chamy, R., & Esparza B., M. (2024, 2 de diciembre). Informe n.º 6: Informe final consolidado. Estudio de caracterización de los residuos sólidos domiciliarios y asimilables generados a nivel municipal en Chile (Licitación ID 761-17-LR23) [Informe técnico]. Núcleo Biotecnología Curauma, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Ubicación de Puntos de Reciclaje Bajo Incertidumbre: Un Enfoque Basado en Comportamiento y Capacidad

1st Gonzalo Méndez-Vogel†
Departamento Ciendias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Concepción, Chile
gonzalo.mendez@unab.cl

2nd Sebastián Dávila-Gálvez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
sebastian.davila@usach.cl

3rd Pedro Jara-Moroni
Departamento de Economía
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
pedro.jara@usach.cl

4th Jorge Zamorano
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
jorge.zamorano.f@usach.cl

***Resumen*—Los sistemas de reciclaje en zonas urbanas muchas veces no cumplen sus objetivos debido a una mala planificación de la infraestructura y una comprensión limitada del comportamiento de los usuarios. Este estudio propone un modelo de localización de contenedores que incorpora incertidumbre en las decisiones de reciclaje de los usuarios, así como las limitaciones de capacidad de los contenedores. A través de simulaciones con datos reales, demostramos que una reubicación estratégica de los puntos puede mejorar significativamente la cantidad reciclada y reducir el desbordamiento de los contenedores. Los resultados destacan la importancia de integrar factores humanos y restricciones del sistema en la planificación urbana.**

I. Introducción

El crecimiento urbano ha intensificado el desafío del manejo de residuos sólidos domiciliarios. Como respuesta, muchas ciudades han promovido el reciclaje como una herramienta clave para avanzar hacia la sostenibilidad. Sin embargo, estas iniciativas muchas veces fracasan porque los modelos tradicionales de ubicación de contenedores no consideran cómo se comportan realmente las personas.

Normalmente, se asume que si un usuario vive cerca de un contenedor, reciclará. Pero esto no siempre ocurre. Las personas pueden decidir no reciclar por falta de tiempo, motivación o simplemente porque no le interesa. Además, factores como iluminación o seguridad también influyen en la decisión de participar. La mayoría de los usuarios no sabe si un contenedor está disponible antes de acercarse, y eso afecta negativamente su experiencia [1], [2].

II. Propuesta

Para enfrentar estas limitaciones, desarrollamos un modelo que incorpora la incertidumbre en las decisiones de los usuarios y los riesgos de desborde. En lugar de asumir que todos reciclan bajo ciertas condiciones, utilizamos una formulación probabilística que estima la probabilidad de que un usuario participe en función de la accesibilidad y utilidad percibida.

Este enfoque se basa en modelos de localización desarrollados en investigación operativa, adaptados para incluir restricciones de capacidad y decisiones individuales. Lo aplicamos a un caso real en Estación Central, Santiago de Chile, utilizando datos de generación de residuos y reportes institucionales [3].

III. Modelo Matemático

Sean $\mathcal{I}$ los puntos de demanda y $\mathcal{J}$ las localizaciones candidatas. Parámetros: d_i (generación de material reciclable en i), D_{ij} (distancia i–j), c_j (capacidad en j), n (número de contenedores), $\beta > 0$ (sensibilidad a la distancia), ρ_i (utilidad de la opción de no reciclar), y $\lambda > 0$ (penalización por desbordamiento). Variables: $x_j \in \{0,1\}$ (abrir j), $s_{ij} \in [0,1]$ (probabilidad de que i elija j), $o_j \geq 0$ (desbordamiento en j). Con $u_{ij} = \theta - \beta D_{ij}$ la utilidad sistemática de j para i, planteamos el siguiente MINLP:

$$\max_{x,s,o} \quad \sum_{j\in\mathcal{J}} \sum_{i\in\mathcal{I}} d_i\, s_{ij} \;-\; \lambda \sum_{j\in\mathcal{J}} o_j \tag{1}$$

$$\text{s.a.} \quad s_{ij} \;=\; \frac{\exp(u_{ij})\, x_j}{\exp(\rho_i) \;+\; \sum_{k\in\mathcal{J}} \exp(u_{ik})\, x_k}\,, \quad \forall i \in \mathcal{I},\, j \in \mathcal{J} \tag{2}$$

$$\sum_{j\in\mathcal{J}} x_j \;=\; n, \qquad x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in \mathcal{J} \tag{3}$$

$$\sum_{i\in\mathcal{I}} d_i\, s_{ij} \;\leq\; c_j + o_j, \quad o_j \geq 0, \quad \forall j \in \mathcal{J} \tag{4}$$

La función objetivo (1) maximiza la captura esperada y penaliza el desbordamiento. La restricción (2) modela la

†Autor correspondiente.

elección del usuario con una regla logit que incluye la opción de no reciclar (ρ_i) y activa sólo instalaciones abiertas (x_j). La restricción (3) fija el número de contenedores. La restricción (4) limita el flujo por capacidad permitiendo desbordamiento o_j penalizado por λ.

IV. Resultados

Los resultados muestran que es posible mejorar el sistema sin aumentar el número de contenedores. Configuraciones con un 25 % menos de contenedores que el estado actual pero que están bien ubicados recolectan más residuos que el estado actual con en la comuna. Además, se reduce considerablemente el desbordamiento y se mejora el acceso en zonas clave.

Esto demuestra que una planificación basada en comportamiento puede ser más eficiente que una planificación basada únicamente en cobertura geográfica.

V. Conclusiones

El éxito de los programas de reciclaje no depende solo de la cantidad de contenedores, sino de cómo se ubican y de cómo las personas interactúan con ellos. Incorporar el comportamiento humano y las restricciones del sistema en los modelos de optimización permite diseñar sistemas más efectivos.

Este enfoque puede extenderse a otros servicios urbanos como transporte, salud o movilidad compartida, donde la decisión del usuario es clave para el rendimiento del sistema.

Referencias

[1] REP, Ministerio del Medio Ambiente, "Reglamento que regula el procedimiento de elaboración de los decretos supremos establecidos en la ley n° 20.920," https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1111512, 2017.

[2] M. Struk, "Distance and incentives matter: The separation of recyclable municipal waste," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 122, pp. 155–162, 2017. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917300320

[3] Sistema Nacional de Declaración de Residuos, SINADER, "Sistema nacional de declaración de residuos," https://portalvu.mma.gob.cl/sinader/, 2021.

Marco de Optimización para la evaluación de Políticas Públicas de Reciclaje y Diseño de Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado

1st Vicente Marín Vélez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
vicente.marin@ce.ucn.cl

2nd Francisco Tapia Ubeda
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
francisco.tapia@ucn.cl

3rd Pablo Becerra Muñoz
Departamento de Ingeniería y Negocios
Universidad de Atacama
Copiapó, Chile
pablo.becerra@uda.cl

***Abstract*—La emergencia climática, entre otros aspectos, ha generado una presión por incorporar la sostenibilidad como eje fundamental en la gestión de redes de cadenas de suministro. Sin embargo, son pocas las investigaciones que abordan de manera integral los aspectos de la sostenibilidad, especialmente en el diseño de estas redes, y específicamente desde una perspectiva de optimización. El objetivo de esta investigación es desarrollar un marco de optimización para el diseño de redes de cadenas de suministro integrando aspectos económicos, ambientales y sociales, y que permita gestionar eficientemente residuos tanto domésticos como industriales. Como parte del estudio, se evalúa el diseño y desempeño de la red bajo diferentes esquemas de políticas públicas, tanto coercitivas como de incentivos,y que también inciden en los distintos niveles de la cadena. Esto permite encontrar la configuración óptima de la red bajo la política considerada. La implementación del marco propuesto apoya el proceso de toma de decisiones en múltiples niveles organizacionales, promoviendo prácticas sostenibles y apoyando la adopción de políticas públicas que mejoren el rendimiento general de las cadenas de suministro. Los resultados obtenidos a partir de instancias sintéticas refuerzan la relevancia de integrar decisiones estratégicas y criterios de sostenibilidad en el diseño de redes de cadenas de suministro, demostrando el impacto positivo de este enfoque integral.**

***Index Terms*—Cadena de Suministro de Ciclo Cerrado, Gestión de Residuos, Diseño de Red de Cadena de Suministro, Políticas Públicas, Optimización.**

I. Introducción y Revisión Bibliográfica

Esta sección aborda temas relacionados a las Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado desde la perspectiva de su concepto y cómo se ha tratado en la literatura, y el cómo se integran las políticas públicas.

A. Concepto de Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado

Comúnmente los sistemas industriales de producción han funcionado siguiendo un modelo lineal de *producción – consumo – desecho*, donde la disposición final de este último no era considerada con mayor importancia más que terminar, al final de su vida útil, en un depósito de vertederos para su posterior incineración [1]. Sin embargo, hoy en día, es racional pensar en nuevos patrones de consumo donde el principal enfoque recae en la sostenibilidad de los sistemas, en el cual se permita lograr una transición eficiente hacia un desarrollo sostenible [2]. A medida que la sociedad ha desarrollado y ampliado su conocimiento con respecto a la sostenibilidad, ahora el diseño de una red de cadena de suministros se centra no solo en velar por aspectos económicos, sino que también en equilibrar con beneficios ambientales, impactos sociales y maximizar el valor del producto [3]. El objetivo de diseñar una red de cadena de suministro de ciclo cerrado es optimizar los beneficios económicos, ambientales y sociales de manera simultánea al mismo tiempo que se satisface la demanda de los clientes [4].

B. Políticas públicas en Cadenas de Suministro de Ciclo Cerrado

Las cadenas de suministro de ciclo cerrado (CLSC) tienen un efecto positivo en la reducción de la contaminación ambiental y, por lo tanto, muchos gobiernos han introducido políticas que apoyan a las empresas a realizar la transición hacia un nuevo paradigma de ciclo cerrado. Es por esto mismo que los gobiernos tienen que ir mejorando y/o creando nuevas políticas tanto restrictivas como permisivas, que apoyen a mejorar la toma de decisiones de la empresa y puedan transformar su sistema lineal a uno circular [5]. Algunos autores incorporan las políticas públicas en los modelos de optimización de distintas maneras. [6] analiza el impacto de las tasas de licencia (permisos) de reciclaje y las tasas de reciclaje de remanufactura en cada miembro de la CLSC. [7] aborda dos políticas medioambientales distintas, enfocadas en la limitación de la producción y el impuesto sobre las emisiones de carbono. [8] evalúa políticas de incentivo al consumidor para el retorno de productos e incentivos a las organizaciones para fomentar prácticas de reciclaje.

Por todo esto, en esta investigación se propone un marco basado en modelos de optimización, donde se haga hincapié en la importancia del diseño de la red de cadena de suministro de ciclo cerrado dependiendo de las diferentes políticas públicas que afectan a los diferentes participantes de esta misma. Con esto, se permitirá obtener distintas configuraciones de la red en base al funcionamiento particular de una política pública.

II. Definición del problema

Como se muestra en la Fig.1, se consideran P plantas de producción que atienden a W centros de distribución para atender la demanda de C clientes. Los clientes pueden retornar productos usados hacia la red, una vez consumidos, mediante eslabones que componen la logística de recuperación. Primero se tiene a los S almacenes de chatarra (o almacenes de recolección) donde los clientes retornan los productos. Los almacenes de chatarra realizan la clasificación de los productos retornados en función de su estado mediante una proporción de producto (alpha, betha o gamma): remanufactura, reciclaje y desecho. Los productos destinados a remanufactura (alpha) se retornan hacia las P plantas, los productos destinados a reciclaje (betha) se envían a las R plantas de reciclaje y, finalmente, los productos restantes son desechados de la red como basura (gamma). Una vez que los productos son procesados como reciclaje, se convierten en M materias primas, las cuales son enviadas desde las plantas de reciclaje R a los centros de retorno H. Estos almacenes se encargan de almacenar estas materias primas recuperadas y oportunamente retornarlos a la red superior, hacia la planta. La calidad del producto es medida en función de la cantidad de veces que este a circulado por la red, tratándose en otras palabras de la etapa en la que se encuentra el producto K. Además de esto, se considera una ponderación, en la clasificación de los productos, con respectos a los productos que son enviados a la planta, planta de reciclaje o desecho. Además de esto, pueden existir otros agentes externos a la red, y pueden participar en ella directamente. Existen comunidades locales que ingresan a la red productos retornados (envían a los almacenes de chatarra). Además, existen mercados existentes fuera de la red, que demandan materia prima reciclada, por lo que se les envía materia prima desde los centros de retorno. Entonces es importante mencionar que los eslabones de conexión entre los agentes externos con la red son los almacenes de chatarra (con las comunidades locales) y los centros de retorno (con los mercados).

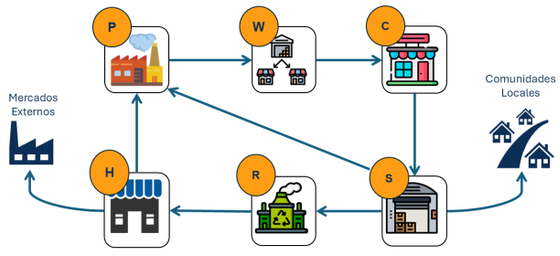


Fig. 1. Diseño de una red CLSC.

III. Modelo Matemático

El modelo considera principalmente la toma de decisiones de producción (planta y planta de reciclaje) y de inventario (planta, centro de distribución, almacén de chatarra, planta de reciclaje y centro de retorno). Este problema es formulado como un modelo de programación lineal entero mixto (MILP).

Se consideran los siguientes supuestos para la formulación del modelo propuesto:

- Se trabaja con un único tipo de producto.
- La planta realiza la manufactura y remanufactura de productos.
- Se supone que la materia prima, desde los proveedores, siempre estará disponible.
- Se consideran costos unitarios para el transporte y producción de productos.
- Los costos de operación y de instalación son variables por periodo.
- Las tasas de retorno de productos por los clientes son conocidas.
- No existen tiempos de set-up en producción.

Además, se definen las variables de decisión que siguen a continuación:

MP_{ptk}	:	Cantidad producida en la planta p en el periodo t con la etapa k.
MR_{mrt}	:	Cantidad de materia prima m producida en la planta p en el periodo t.
r_{cst}	:	Cantidad de producto retornado por el cliente c al centro s en el periodo t.
Z_{ijtk}	:	Flujo de producto transportado desde i a j en el periodo t con la etapa k.
Z_{ijtm}	:	Flujo de materia prima m transportada desde i a j en el periodo t.
I_{it}	:	Inventario en el nodo i en el periodo t.
X_i	:	Variable binaria que es 1 si se instala el nodo i.
Y_{ijt}	:	Variable binaria que es 1 si se asigna el nodo i al nodo j en el periodo t.
U_{it}	:	Variable binaria que es 1 si se utiliza el nodo i en el periodo t.

El modelo matemático propuesto es como sigue:

$$\text{Min } f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \tag{1}$$

$$\text{s.a:} \tag{2}$$

$$\sum_{k=0}^{K} (MP_{ptk} \cdot tp_{pk}) \leq TP_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \tag{3}$$

$$MP_{ptk} = \sum_{w=0}^{W} ZPW_{pwt(k+1)} \quad \forall p \in P, t \in T, \forall k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{N} Z_{jitk} + I_{t(t-1)k} =$$

$$I_{itk} + \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{J} Z_{ijtk} \quad \forall t \in T, \forall k \in K \tag{5}$$

$$\sum_{c=0}^{C} Z_{cstk} \cdot \alpha_s = \sum_{p=0}^{P} Z_{sptk} \quad \forall t \in T, \forall k \in K, \forall s \in S \tag{6}$$

$$\sum_{c=0}^{C} Z_{cstk} \cdot \beta_s = \sum_{r=0}^{R} Z_{sprtk} \quad \forall t \in T, \forall k \in K, \forall s \in S \tag{7}$$

$$\sum_{c=0}^{C} Z_{cstk} \cdot \gamma_s = Z_{stk} \quad \forall t \in T, \forall k \in K, \forall s \in S \tag{8}$$

$$\sum_{s=0}^{S} Z_{srtk} \cdot \epsilon_{mk} = \sum_{h=0}^{H} Z_{rhtm} \forall t \in T, \forall m \in M, \forall r \in R \quad (9)$$

$$U_{it} \leq X_i \quad \forall\, i \in N \quad (10)$$

$$Y_{ijt} \leq U_{it} \quad \forall\, i \in N, \forall t \in T \quad (11)$$

$$MP_{ptk} \geq 0 \quad \forall\, p \in P, t \in T, k \in K \quad (12)$$

$$MR_{mrt} \geq 0 \quad \forall\, m \in M, r \in R, t \in T \quad (13)$$

$$r_{cst} \geq 0 \quad \forall\, c \in C, s \in S, t \in T \quad (14)$$

$$Z_{ijtk} \geq 0 \quad \forall\, i \in N, j \in C, k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$Z_{ijtm} \geq 0 \quad \forall\, i \in N, j \in C, m \in M, t \in T \quad (16)$$

$$I_{it} \geq 0 \quad \forall i \in N, t \in T \quad (17)$$

$$X_i \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in N, j \in N \quad \text{si} \quad i \neq j \quad (18)$$

$$Y_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in N, j \in N \quad \text{si} \quad i \neq j \quad (19)$$

$$U_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, i \in N, j \in N \quad \text{si} \quad i \neq j \quad (20)$$

La función objetivo (1) busca minimizar los costos totales de operación asociados a los costos de instalación (f_1), utilización-inventario (f_2), transporte (f_3), manufactura (f_4) y reciclaje (f_5). La restricción (3) establece la producción en la planta, asegurando consistencia en los tiempos de producción. La restricción (4) detalla el flujo transportado hacía los centros de distribución y el aumento de la etapa del producto. La restricción (5) mantiene el balance de flujo en los eslabones. La restricción (6),(7) y (8) establecen la clasificación de productos en el almacén de chatarra. La restricción (9) detalla la transformación de producto a materias primas. La restricción (10) asegura que no hayan centros utilizados, sin ser instalados. La restricción (11) establece que no pueden haber asignaciones si el centro no es utilizado. En las restricciones (12) hasta la (20) se define el dominio de las variables de decisión del problema.

IV. Discusión y Conclusión

Con la implementación de este marco propuesto, se facilita la toma de decisiones en los diferentes niveles organizacionales, promoviendo prácticas de sostenibilidad y la adopción de políticas públicas que favorezcan el desempeño en las cadenas de suministro.

A partir del modelo propuesto, se puede evidenciar como diferentes configuraciones de políticas públicas pueden influir significativamente en la estructura óptima de una red de cadena de suministro de ciclo cerrado. Políticas públicas mas restrictivas obligan a rediseñar los flujos de materiales, así como también, la ubicación y la producción de los distintos nodos. Por otro lado, las políticas públicas de incentivos promueven un mayor aprovechamiento de los productos usados, impactando en una mayor carga operativa para las plantas de reciclaje y centros de retorno. El desarrollo de este marco permite capturar la flexibilidad de estos efectos y entregar soluciones que, además de estar alineadas con las distintas políticas públicas, entregan resultados de una manera integral bajo estas condiciones regulatorias.

Esta investigación presenta un marco de optimización para el diseño de redes de cadenas de suministro de ciclo cerrado, integrando aspectos claves como la sostenibilidad en operaciones y la evaluación de distintas políticas públicas de reciclaje. El modelo presentado demuestra que es posible evaluar cuantitativamente el impacto de políticas públicas específicas y como estas afectan, o en algunos casos, configuran el diseño de la red. Este enfoque integral no solo facilita la toma de decisiones estratégicas por parte de las organizaciones, sino que también proporciona una herramienta útil para fomentar y validar las políticas públicas que busquen representar los modelos circulares de modelos logísticos. El modelo muestra una buena eficiencia computacional, sin embargo, es necesario ampliar el tamaño del diseño de experimentos para obtener resultados más representativos. Futuros trabajos podrían considerar la incorporación de multiobjetivos al modelo para proporcionar resultados que respalden la toma de decisiones de una perspectiva más global. Otros aspectos que podrían considerarse sería la incertidumbre en los retornos o demanda de los clientes o nuevos enfoques de modelamiento para este problema.

References

[1] D. Andrews, "The circular economy, design thinking and education for sustainability," *Local economy*, vol. 30, no. 3, pp. 305–315, 2015.

[2] S. Rezaei and A. Kheirkhah, "A comprehensive approach in designing a sustainable closed-loop supply chain network using cross-docking operations," *Computational and Mathematical Organization Theory*, vol. 24, no. 1, pp. 51–98, 2018.

[3] X. Cao, Y. Li, and K. Huang, "Transfusions or hematopoiesis? how government subsidies and extended warranties feed decision-making about low-quality recycled used products in closed-loop supply chains," *Kybernetes*, vol. 52, no. 11, pp. 5284–5306, 2023.

[4] J. D. Linton, R. Klassen, and V. Jayaraman, "Sustainable supply chains: An introduction," *Journal of operations management*, vol. 25, no. 6, pp. 1075–1082, 2007.

[5] H. Song, Q. Li, K. Liu, and Y. Li, "The recycling strategy of closed-loop supply chain considering csr under the government's reward–penalty policy," *Sustainability*, vol. 14, no. 21, p. 14228, 2022.

[6] Z. Liu, W. Sun, B. Hu, C. Han, P. Ieromonachou, Y. Zhao, and J. Zheng, "Research on supply chain optimization considering consumer subsidy mechanism in the context of carbon neutrality," *Energies*, vol. 16, no. 7, p. 3147, 2023.

[7] M. De and B. Giri, "Modelling a closed-loop supply chain with a heterogeneous fleet under carbon emission reduction policy," *Transportation research part e: logistics and transportation review*, vol. 133, p. 101813, 2020.

[8] A. Hassanpour, J. Bagherinejad, and M. Bashiri, "A robust bi-level programming model for designing a closed-loop supply chain considering government's collection policy," *Scientia Iranica*, vol. 26, no. 6, pp. 3747–3764, 2019.

Un modelo binivel para la localización de contenedores de recolección de residuos textiles

1st Dámaris Arizhay Dávila Soria
Facultad de Ingeniería y Ciencias aplicadas
Universidad de los Andes
Santiago, Chile
daavilas@uandes.cl

2nd Mario Alberto Aguirre Lopez
Facultad de ciencias en Física y Matemáticas
Universidad Autónoma de Chiapas
Chiapas, México
marioal1906@gmail.com

3rd José Guadalupe Flores Muñíz
Facultad de Ciencias Fïsico Matemáticas
Universidad Autónoma de Nuevo León
Nuevo León, México
jfloresm@uanl.edu.mx

4th José-Fernando Camacho-Vallejo
Escuela de Ingeniería y Ciencias
Tecnologico de Monterrey
Nuevo León, México
fernando.camacho@tec.mx

***Abstract*—En este trabajo se propone un modelo de optimización binivel para la recolección de residuos textiles, considerando las interacciones entre la empresa encargada de la recolección y las industrias locales responsables del upcycling y downcycling, con el fin de extender la vida útil de los residuos. El modelo busca maximizar las ganancias de la empresa recolectora derivadas de la localización de los contenedores, tomando en cuenta restricciones de capacidad, demandas de las remanufactureras y precios que estas ofrecen por el contenido textil recolectado en cada contenedor. Debido a su estructura, el modelo binivel se reformula en un modelo de un solo nivel mediante la aplicación de dualidad fuerte. El modelo resultante se valida mediante experimentación computacional y el análisis de un caso de estudio. Los resultados evidencian beneficios tanto para las empresas recolectoras como para las pequeñas remanufactureras al implementar este enfoque.**

***Index Terms*—Binivel, Localización, Reciclaje**

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la incorporación de decisiones relacionadas con la sustentabilidad ha incrementado su relevancia en la cadena de suministros [1]. En respuesta a esta necesidad, surge el concepto de Cadena de Suministros Circular (CSC), con el objetivo de extender el ciclo de vida de los productos mediante estrategias de reciclaje y reutilización [6]. Dentro de las estrategias de reciclaje, un aspecto importante a considerar es la infraestructura correspondiente, como los centros de recolección o puntos de acopio, que son fundamentales para mejorar la eficiencia de los procesos [2]. En la literatura pueden encontrarse numerosos estudios sobre la localización de contenedores para el reciclaje de diferentes materiales, tomando en cuenta consideraciones como: peligrosidad de los materiales, accesibilidad social, costos logísticos y otros aspectos críticos ([3], [4]). Un área particular de interés es la industria textil, donde el auge del fast fashion ha generado una eliminación excesiva de prendas, en la mayoría de los casos antes de que estas lleguen al final de su vida útil. Por esta razón, es importante desarrollar estrategias que optimicen la recolección y, al mismo tiempo, faciliten la reintegración de los textiles sin depender de procesos químicos. Con esta motivación, este trabajo propone una estrategia para la localización de contenedores de recolección de residuos textiles, considerando la accesibilidad para la población. Además, para fortalecer la CSC se consdiera asignar las prendas recolectadas en estos contenedores a remanufactureras locales especializadas en upcycling, que reutilizan los textiles desechados según su estado. La integración de remanufactureras locales especializadas en upcycling facilita la reinserción directa de las prendas en nuevos ciclos productivos, reduce la dependencia de métodos de reciclaje intensivos en recursos y minimiza la acumulación de residuos textiles en vertederos.

I. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Consideremos una empresa privada de reciclaje responsable de recolectar residuos textiles. Esta empresa reúne residuos en cualquier estado (en términos de calidad textil) mediante la colocación estratégica de contenedores de recolección en toda la ciudad. Dado que las personas que donan sus prendas no buscan incentivos económicos, la ubicación de los contenedores prioriza la accesibilidad para fomentar la participación social. Los residuos recolectados en cada contenedor son posteriormente adquiridos por empresas locales de remanufactura, las cuales cuentan con presupuestos máximos para garantizar la viabilidad del negocio y ajustarse a sus capacidades de producción, considerando además las ganancias que obtendrán del uso de los residuos textiles comprados en cada contenedor.

En este problema intervienen dos niveles de decisión: uno asociado con la empresa de reciclaje y otro con las empresas remanufactureras. En el primer nivel, la empresa de reciclaje se encarga de localizar los contenedores para acumular los textiles y busca maximizar su beneficio derivado de la venta de los textiles recolectados. En el segundo nivel, las empresas remanufactureras procuran maximizar su beneficio comprando los textiles de los contenedores a la empresa de reciclaje.

Las remanufactureras ofrecen un precio por contenedor que depende de los costos de transporte hasta sus instalaciones y de la "calidad" esperada del contenido del contenedor. El término "calidad" se refiere a una medida subjetiva percibida por las remanufactureras según la ubicación del contenedor, que influye en los beneficios proyectados por la venta de los nuevos productos elaborados con los textiles recuperados de cada contenedor, según su especialización. En consecuencia, las remanufactureras pueden presentar ofertas diferentes para un mismo contenedor.

Este problema se formula como un modelo de programación binivel, en el que los tomadores de decisiones interactúan dentro de una estructura jerárquica.

II. Modelo propuesto

La Figura 1 muestra la estructura general del modelo de programación binivel propuesto para la localización de los contenedores de recolección textil, teniendo en cuenta las ofertas de las remanufactureras.

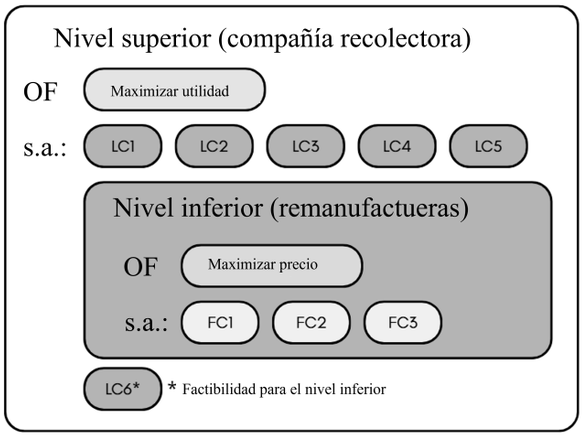


Fig. 1. Estructura general del modelo de programación binivel propuesto

En este modelo, las unidades que deben asignarse a los contenedores de recolección se denominan *Unidades Básicas* (UB), las cuales pueden representar vecindarios, municipios, hogares, etc.

Como se mencionó anteriormente, la decisión del nivel superior implica determinar las ubicaciones de los contenedores de recolección, asignar las UBs a dichos contenedores y, posteriormente, asignar los contenedores a las remanufactureras locales. La función objetivo del nivel superior busca maximizar la utilidad generada, calculada como los ingresos provenientes de la venta de los contenedores asignados a las remanufactureras menos el costo de colocarlos.

Las restricciones del nivel superior se definen de la siguiente manera: LC1 garantiza que cada UB se asigne únicamente a un contenedor. LC2 asegura que los contenedores de recolección ubicados tengan suficiente capacidad para recibir los textiles provenientes de la UB. LC3 establece que, como máximo, puede colocarse un contenedor de recolección en cada sitio. LC4 especifica que los textiles recolectados en los contenedores solo pueden asignarse a una remanufacturera. Finalmente, LC5 limita la cantidad máxima de textiles que cada remanufacturera puede adquirir.

En el nivel inferior, cada remanufacturera decide el precio de los contenedores. El objetivo es maximizar la suma de los precios fijados para los contenedores más el beneficio obtenido del uso de los textiles recolectados en ellos. Con respecto a las restricciones del nivel inferior, FC1 garantiza que los precios ofrecidos permanezcan dentro del rango aceptable para las remanufactureras. FC2 determina el precio de los contenedores de recolección asignados a cada remanufacturera. FC3 establece que las desviaciones de beneficio deben ser menores a 1, lo que significa que la empresa puede ganar como máximo el doble de la utilidad esperada por unidad del contenedor de recolección adquirido.

Finalmente, LC6* es una restricción de acoplamiento en el nivel superior que garantiza la factibilidad del problema del seguidor.

III. Solución y resultados esperados

En el modelo binivel propuesto, el nivel inferior corresponde a un problema de programación lineal continua. Para resolver el nivel superior, el problema del nivel inferior se reformula primero utilizando el teorema de dualidad fuerte y se incorpora como restricción al problema del nivel superior. Esta transformación permite reformular el modelo binivel como un problema de programación de un solo nivel. Sin embargo, dado que el modelo resultante es no lineal debido al producto de variables de los niveles superior e inferior, dicho producto también se linealiza. Como resultado, el problema binivel se convierte en un problema de programación lineal entera mixta (MILP) de un solo nivel, que puede resolverse mediante el solver CPLEX.

Para analizar el modelo, se proponen instancias de tamaño pequeño y mediano, midiendo los tiempos de cómputo correspondientes a cada tamaño de instancia. Finalmente, el modelo se aplica a un caso de estudio y se discuten los principales hallazgos gerenciales derivados del problema.

References

[1] Koberg, E., & Longoni, A. A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1084–1098, 2019.

[2] Nevrlỳ, V., Šomplák, R., Smejkalová, V., Lipovskỳ, T., & Jadrnỳ, J. Location of municipal waste containers: Trade-off between criteria. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123445, 2021.

[3] Rousta, K., Bolton, K., Lundin, M., & Dahlén, L. Quantitative assessment of distance to collection point and improved sorting information on source separation of household waste. *Waste Management*, 40, 22–30, 2015.

[4] Viktorin, A., Hrabec, D., Nevrlý, V., Šomplák, R., & Šenkeřík, R. Hierarchical clustering-based algorithms for optimal waste collection point locations in large-scale problems: A framework development and case study. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109142, 2023.

[5] Jia, F., Yin, S., Chen, L., & Chen, X. The circular economy in the textile and apparel industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120728, 2020.

[6] Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882–900.

Session N°4 – Track N°4

Network Design and Location

Chair: Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
Place: X-103
Time: 17:30 – 18:45

Diseño de un Sistema de Recolección de Residuos Domiciliarios Reciclables a través de un Problema de Localización de Contenedores y Ruteo de Vehículos

Time: 17:30 – 17:45
Authors:

- Ledezma-Pizarro, B. *(Universidad Católica del Norte)*
- Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Blázquez, C. *(Universidad Andrés Bello)*
- Flórez-Calderón, L. *(Universidad Católica del Norte)*

Una Heurística de Localización-Asignación-Mejora para un Problema de Diseño Territorial en Instituciones Microfinancieras

Time: 17:50 – 18:05
Authors:

- Salazar-Treviño, E. *(Universidad Autónoma de Nuevo León)*
- Ríos-Mercado, R. *(Universidad Autónoma de Nuevo León)*
- Huerta-Muñoz, D. *(Universidad Autónoma de Nuevo León)*

Risk-Based Maximal Covering Location Problem with Accessibility Indicators and Mobile Units

Time: 18:10 – 18:25
Authors:

- Marquez-Heredia, D. *(Tecnologico de Monterrey)*
- Martínez-Fantini, L. *(Universidad Anáhuac)*
- Regis-Hernández, F. *(Université TÉLUQ)*
- Ríos-Solís, Y. *(Tecnologico de Monterrey)*
- Vicencio-Medina, S. *(Universidad Andrés Bello)*

Un Modelo de Dos Etapas de Localización con Inventarios para el Diseño Resiliente de la Red de la Cadena de Suministros

Time: 18:30 – 18:45
Authors:

- Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
- Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Olivares-Benitez, E. *(Universidad Panamericana)*
- Peralta-González, J. *(Universidad Católica del Norte)*

Diseño de un sistema de recolección de residuos domiciliarios reciclables a través de un problema de localización de contenedores y ruteo de vehículos

Benjamín Ledezma-Pizarro
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
benjamin.ledezma@ce.ucn.cl

Pablo A. Miranda-González
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
pablo.miranda@ucn.cl

Carola A. Blázquez
Departamento de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Viña del Mar, Chile
cblazquez@unab.cl

Luz Flórez-Calderón
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
luz.florez@ucn.cl

***Abstract*—El diseño eficiente de sistemas de gestión de residuos domiciliarios es una compleja tarea que normalmente concierne a los municipios. Por otra parte, debido al calentamiento global y al aumento significativo en la generación de residuos, es fundamental disminuir la huella de carbono aplicando conceptos de economía circular, particularmente a través del reciclaje, el cual es promovido por medio de políticas públicas. Como consecuencia de lo anterior, surge la necesidad de diseñar e implementar sistemas de recolección de residuos domiciliarios reciclables. De este modo, la presente investigación tiene como objetivo diseñar un sistema de recolección para residuos reciclables domiciliarios, aplicables a entornos urbanos y tomando en cuenta aspectos de sostenibilidad. Cabe destacar que, a diferencia de estudios previos, se propone un modelo de programación lineal entera mixta multiobjetivo, el cual busca decidir las localizaciones de contenedores y el diseño de rutas de recolección en forma simultánea. La resolución de este problema será abordada a través de herramientas de optimización multiobjetivo (epsilon Constraint) y será aplicada dentro de la comuna de Renca en la Región Metropolitana (Chile).**

Keywords*—*Ruteo de Vehículos; Localización y Asignación; Optimización Multiobjetivo; Gestión de residuos; Reciclaje; Residuos Domiciliarios.

I. Introducción

La gestión de residuos domiciliarios es esencial para mitigar los impactos negativos en la salud pública, tales como la propagación de enfermedades o el deterioro en sectores como el turismo [1], [2]. Esta problemática representa un gran desafío para la sociedad en su conjunto, en donde las autoridades gubernamentales cumplen un rol fundamental [3]. De hecho, la situación se ha visto agravada en las últimas décadas, debido al acelerado crecimiento demográfico e industrial a nivel mundial [4], [5].

Dado el contexto anterior, la sostenibilidad establece criterios y metodologías para abordar los problemas derivados de la generación de residuos [6]. Entre las propuestas destacadas surge la economía circular, la cual incluye particularmente las técnicas de reciclaje, permitiendo la reutilización de desechos. Sin embargo, promover el reciclaje es un desafío importante debido al bajo interés por parte de las autoridades y empresarios, así como al desconocimiento de la población [7]. No obstante, en estos últimos años se han promulgado leyes que apoyen el reciclaje, como es el caso de la Ley 20.920 de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) publicada en 2016 [8].

En particular, una manera ampliamente utilizada para abordar este problema es a través de modelos de ruteo de vehículos y de localización de contenedores. Los primeros se encargan del diseño de rutas de recolección de residuos, mientras que los segundos se ocupan de la localización de puntos para el acopio de residuos [9], los cuales pueden ser acumulados en contenedores ubicados estratégicamente. Estos modelos han sido estudiados por diversos autores [10], [11], [12], [13], destacando frente a los esquemas puerta a puerta, debido a una reducción de distancias recorridas por la flota de camiones, una mayor eficiencia operativa [14] y una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero [15]. Además, se atenúan problemas comunes de las zonas urbanas, tales como el tráfico vehicular, los accesos a calles estrechas o los largos tiempos de recolección. Estos tipos de problemas han sido ampliamente estudiados en la literatura a través de modelos independientes o por etapas [16], en el cual el proceso de optimización es secuencial.

De este modo, esta investigación propone un modelo de programación lineal entero mixto multiobjetivo, cuyas decisiones han sido escasamente abordadas en forma simultánea, más aún, bajo un contexto de residuos domiciliarios reciclables. En este enfoque, las decisiones asociadas a la instalación de contenedores y al diseño de ruta se toman de manera simultánea [17], lo cual permite obtener mejores soluciones para el sistema en su conjunto. A diferencia de estudios anteriores, este modelo propone la asignación de contenedores a subdivisiones de manzanas, las cuales son generadas con base en Diagramas de Voronoi, lo que permite trabajar con unidades más pequeñas.

Cabe destacar que, cuando se trata de la gestión de residuos domiciliarios reciclables, los artículos encontrados en la literatura son más escasos en comparación con residuos generales, lo que refuerza la relevancia de esta propuesta. Finalmente, se plantea abordar dicho problema a través de técnicas de optimización multiobjetivo.

II. Descripción y Formulación del Problema

El propósito de este problema es la minimización de costos de instalación de contenedores, de la distancia involucrada en el traslado de los desechos por parte de los

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

habitantes involucrados hacia los contenedores a instalar y de los costos de traslado de un camión dedicado a la recolección de dichos residuos. De otro modo, el modelo determina las ubicaciones y la cantidad de contenedores que se instalarán, define la asignación de las zonas generadoras de residuos a las ubicaciones de contenedores y diseña la ruta de recolección a realizar por parte del camión.

Se cuenta con N ubicaciones potenciales para instalar contenedores de capacidad Q con un costo unitario M. En cada posición se limita a un mínimo B_{min} y un máximo B_{max} de contenedores. Además, la cantidad de ubicaciones seleccionadas se encuentra restringida a un mínimo P_{min} y un máximo P_{max} y existe un límite presupuestario de R contenedores a instalar.

De este modo, un camión proveniente de un depot ($i = 0$) debe visitar todas las ubicaciones seleccionadas, donde trasladarse entre una ubicación i y una ubicación j, implica un costo C_{ij}. Se asume que el camión cuenta con la capacidad suficiente para realizar todo el proceso de recolección.

Existe un conjunto de K zonas generadoras de residuos, las cuales son representadas por un centroide, desde las cuales se determinan las distancias hacia las ubicaciones de contenedores, y donde se concentra toda la generación de la zona. Cada zona genera un total de V_k kilos de residuos en cada periodo (e.g., semanal). Finalmente, se establece una distancia máxima aceptable D_{max}, entre un centroide y una ubicación de contenedores.

Las variables de decisión del modelo son las siguientes:

X_i: Variable binaria que toma el valor 1 si se instala al menos un contenedor en la ubicación i ($i = 1, 2,\ldots, N$).

Z_i: Variable entera que indica la cantidad de contenedores a instalar en la ubicación i ($i = 1, 2,\ldots, N$).

W_{ik}: Variable binaria que toma el valor 1 si un centroide o zona k es asignada a una ubicación de contenedores i ($i = 1, 2,\ldots, N;\ k = 1, 2,\ldots, K$).

Y_{ij}: Variable binaria que toma el valor 1 si el vehículo recorre el arco que viaja entre las ubicaciones de contenedores i y j ($i = 1, 2,\ldots, N; j = 1, 2,\ldots, N / i \neq j$).

De este modo, el modelo es formulado de la siguiente manera:

$$Min \qquad \{f_1, f_2, f_3\} \tag{1}$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N} M \cdot Z_i \tag{2}$$

$$f_2 = \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0, j\neq i}^{N} C_{ij} \cdot Y_{ij} \tag{3}$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} D_{ik} \cdot V_k \cdot W_{ik} \tag{4}$$

sujeto a :

$$\sum_{i=1}^{N} X_i \geq P_{\min} \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{N} X_i \leq P_{\max} \tag{6}$$

$$Z_i \geq B_{\min} \cdot X_i \qquad \forall i = 1,\ldots, N \tag{7}$$

$$Z_i \leq B_{\max} \cdot X_i \qquad \forall i = 1,\ldots, N \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{N} Z_i \leq R \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{N} W_{ik} = 1 \qquad \forall k = 1,\ldots, K \tag{10}$$

$$D_{\max} \geq D_{ik} \cdot W_{ik} \qquad \forall i = 1,\ldots, N, \forall k = 1,\ldots, K \tag{11}$$

$$W_{ik} \leq X_i \ \ \forall i = 1,\ldots, N, \forall k = 1,\ldots, K \tag{12}$$

$$\sum_{k=1}^{K} W_{ik} \cdot V_k \leq Q \cdot Z_i \ \ \forall i = 1,\ldots, N \tag{13}$$

$$\sum_{j=1, j\neq i}^{N} Y_{0j} = 1 \tag{14}$$

$$\sum_{j=1, j\neq i}^{N} Y_{j0} = 1 \tag{15}$$

$$\sum_{j=0, j\neq i}^{N} Y_{ij} = X_i \qquad \forall i = 1,\ldots, N \tag{16}$$

$$\sum_{j=0, j\neq i}^{N} Y_{ji} = X_i \qquad \forall i = 1,\ldots, N \tag{17}$$

$$X_i \in \{0,1\} \qquad \forall i = 0,1,\ldots, N \tag{18}$$

$$Z_i \in N_0 \qquad \forall i = 1,\ldots, N \tag{19}$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i = 0,1,\ldots, N, j = 0,1,\ldots, N / i \neq j \tag{20}$$

$$W_{ik} \in \{0,1\} \qquad \forall i = 0,1,\ldots, N, k = 0,1,\ldots, K \tag{21}$$

La función objetivo (1) es la función multiobjetivo del problema, donde f_1 y f_2 son los costos de instalación y de ruteo indicados en las expresiones (2) y (3) respectivamente, mientras que f_3 es la suma de las distancias de asignación entre centroides y contenedores, ponderadas por el peso de la carga transportada, como se indica en la ecuación (4). Las expresiones (5) y (6) aseguran que el modelo seleccione un número mínimo y máximo de ubicaciones para instalar contenedores. Las restricciones (7) y (8) aseguran que se instalen un mínimo y máximo de contenedores por cada ubicación. La expresión (9) asegura que se instalen como máximo R contenedores en toda el área de estudio. La restricción (10) asegura la asignación de una ubicación de contenedores a cada centroide o zona. La ecuación (11) asegura que no se sobrepase la distancia máxima entre cada centroide y su ubicación de contenedores asignada. La restricción (12) asegura que, si un centroide se asigna a la ubicación de contenedores, ésta debe ser seleccionada. La expresión (13) limita el peso total de los residuos acopiados en una ubicación determinada a no sobrepasar la capacidad total de los contenedores instalados en dicha ubicación. Las ecuaciones (14) y (15) aseguran que el camión salga y regrese al depot una sola vez. Las restricciones (16) y (17) aseguran que si se selecciona una ubicación, esta debe ser visitada una sola vez por la ruta. Las expresiones (18) – (21) son restricciones de dominio de las variables de decisión del problema.

Para la eliminación de sub-tours, se utiliza una estrategia basada en flujos ficticios multiproducto (binarios) [18], la cual es una alternativa a las ecuaciones de Miller-Tucker-Zemlin [19], las cuales son ampliamente utilizadas en la literatura.

III. Conclusiones y Comentarios Finales

Para este tipo de problemas, el uso de un modelo integrado permite obtener una solución que aborda tanto la problemática de localización de contenedores para atender un área en

específico como el secuenciamiento de visitas para la recolección de los residuos acopiados en dichos contenedores. Por otra parte, utilizar un enfoque multiobjetivo permite encontrar un conjunto de soluciones eficientes que balancean los distintos objetivos involucrados, es decir, el costo de instalación, el de ruteo y las distancias recorridas para el traslado de los residuos hacia los contenedores. De este modo, el modelo propuesto facilita la toma de decisiones para el diseño de este tipo de sistemas de recolección.

Es importante destacar que el modelo no contempla una clasificación de residuos reciclables ni una separación específica en los contenedores o en el camión, destacándose la posibilidad de realizar dicha segregación como trabajo futuro. Asimismo, no se consideran restricciones asociadas a la capacidad máxima del camión ni a su disponibilidad horaria. La demanda se modela de forma determinística, mientras que la asignación de contenedores se realiza en función de la proximidad, representando limitaciones relevantes a ser estudiadas a futuro.

REFERENCIAS

[1] A. Iqbal, Y. Abdullah, A. S. Nizami, I. A. Sultan, and F. Sharif, "Assessment of Solid Waste Management System in Pakistan and Sustainable Model from Environmental and Economic Perspective," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12680, Oct. 2022, doi: 10.3390/su141912680.

[2] N. Comerio, H. Nagai, F. Pacicco, and M. Serati, "Tourism and waste management: An analysis of municipal solid waste," *International Journal of Tourism Research*, vol. 24, no. 1, pp. 185–187, Jan. 2022, doi: 10.1002/jtr.2490.

[3] G. Rahmanifar, M. Mohammadi, M. Hajiaghaei-Keshteli, G. Fusco, and C. Colombaroni, "An integrated temporal and spatial synchronization for two-echelon vehicle routing problem in waste collection system," *J Ind Inf Integr*, vol. 40, p. 100611, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jii.2024.100611.

[4] T. Hazra and S. Goel, "Solid waste management in Kolkata, India: Practices and challenges," *Waste Management*, vol. 29, no. 1, pp. 470–478, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.023.

[5] I. R. Abubakar *et al.*, "Environmental Sustainability Impacts of Solid Waste Management Practices in the Global South," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 19, p. 12717, Oct. 2022, doi: 10.3390/ijerph191912717.

[6] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?," *J Clean Prod*, vol. 143, pp. 757–768, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

[7] Y. Kalmykova, M. Sadagopan, and L. Rosado, "Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools," *Resour Conserv Recycl*, vol. 135, pp. 190–201, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.034.

[8] Ministerio del Medio Ambiente, "Ley N° 20.920 para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje," Santiago de Chile, Jun. 2016.

[9] V. C. Hemmelmayr, K. F. Doerner, R. F. Hartl, and D. Vigo, "Models and Algorithms for the Integrated Planning of Bin Allocation and Vehicle Routing in Solid Waste Management," *Transportation Science*, vol. 48, no. 1, pp. 103–120, Feb. 2014, doi: 10.1287/trsc.2013.0459.

[10] S. M. H. Erfani, S. Danesh, S. M. Karrabi, and R. Shad, "A novel approach to find and optimize bin locations and collection routes using a geographic information system," *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 35, no. 7, pp. 776–785, Jul. 2017, doi: 10.1177/0734242X17706753.

[11] H. L. Vu, K. T. W. Ng, and D. Bolingbroke, "Parameter interrelationships in a dual phase GIS-based municipal solid waste collection model," *Waste Management*, vol. 78, pp. 258–270, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.05.050.

[12] V. C. Hemmelmayr, K. F. Doerner, R. F. Hartl, and D. Vigo, "Models and Algorithms for the Integrated Planning of Bin Allocation and Vehicle Routing in Solid Waste Management," *Transportation Science*, vol. 48, no. 1, pp. 103–120, Feb. 2014, doi: 10.1287/trsc.2013.0459.

[13] J. R. Kinobe, T. Bosona, G. Gebresenbet, C. B. Niwagaba, and B. Vinnerås, "Optimization of waste collection and disposal in Kampala city," *Habitat Int*, vol. 49, pp. 126–137, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.habitatint.2015.05.025.

[14] C. Blazquez and G. Paredes-Belmar, "Network design of a household waste collection system: A case study of the commune of Renca in Santiago, Chile," *Waste Management*, vol. 116, pp. 179–189, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.07.027.

[15] A. Gilardino, J. Rojas, H. Mattos, G. Larrea-Gallegos, and I. Vázquez-Rowe, "Combining operational research and Life Cycle Assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in Lima (Peru)," *J Clean Prod*, vol. 156, pp. 589–603, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.005.

[16] J.-W. Lu, N.-B. Chang, L. Liao, and M.-Y. Liao, "Smart and Green Urban Solid Waste Collection Systems: Advances, Challenges, and Perspectives," *IEEE Syst J*, vol. 11, no. 4, pp. 2804–2817, Dec. 2017, doi: 10.1109/JSYST.2015.2469544.

[17] M. Tadaros and A. Migdalas, "Bi- and multi-objective location routing problems: classification and literature review," *Operational Research*, vol. 22, no. 5, pp. 4641–4683, Nov. 2022, doi: 10.1007/s12351-022-00734-w.

[18] R. Wong, "Integer programming formulations of the traveling salesman problem," in *Proceedings of the 1980 IEEE international conference of circuits and computers*, 1980, pp. 149–152.

[19] C. E. Miller, A. W. Tucker, and R. A. Zemlin, "Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems," *Journal of the ACM*, vol. 7, no. 4, pp. 326–329, Oct. 1960, doi: 10.1145/321043.321046.

Una heurística de localización-asignación-mejora para un problema de diseño territorial en instituciones microfinancieras

1st Eduardo Salazar-Treviño
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, México
eduardosalaz@outlook.com

2nd Roger Z. Ríos-Mercado
Programa de Posgrado en Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, México
roger@yalma.fime.uanl.mx

3rd Diana L. Huerta-Muñoz
Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas
Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, México
diana.huertam@uanl.mx

***Resumen*—Las instituciones microfinancieras son importantes en economías emergentes como parte de los programas que intentan reducir la desigualdad de ingresos y la pobreza. Se plantea un problema de optimización combinatoria de diseño territorial para minimizar la suma de las distancias de las unidades básicas atendidas por las sucursales, considerando restricciones únicas: balanceo del riesgo de las unidades básicas y del tipo asociado a cada posible sucursal. Se presentan dos métodos de solución: un modelo de programación entera resuelto por Gurobi y una heurística de location-allocation-improvement. Esta heurística consta de dos fases principales (localización y asignación) reforzada con búsqueda local para reparar factibilidad y mejorar calidad siguiendo un esquema de descenso variable de vecindario. Resultados preliminares indican que Gurobi tiene ventaja en instancias pequeñas, pero la heurística encuentra mejores soluciones en menos tiempo para instancias medianas y grandes.**

***Index Terms*—Diseño Territorial, Optimización Combinatoria, Ciencia de Localización, Heurísticas, Microfinanzas**

I. Introducción

Las instituciones microfinancieras juegan un papel crucial en las economías emergentes al formar parte de los programas destinados a reducir la desigualdad de ingresos y combatir la pobreza. Estas instituciones ofrecen crédito y otros productos financieros a mercados desfavorecidos que típicamente son rechazados por los bancos comerciales tradicionales.[2]

II. Descripción del problema

El problema abordado en este trabajo se centra en el diseño territorial óptimo para instituciones microfinancieras, con características únicas que lo distinguen de otros problemas de diseño territorial tradicionales.

II-A. Objetivos y Restricciones

El objetivo principal es minimizar la suma de las distancias de las unidades básicas que son atendidas por las sucursales de la institución. Las sucursales se ubicarán en establecimientos de otros negocios existentes, lo que introduce restricciones adicionales en el problema. [1]

Las restricciones principales incluyen:

- Balanceo del riesgo asociado a los préstamos otorgados entre las distintas sucursales
- Balanceo del número de sucursales por el giro del establecimiento anfitrión
- Balanceo de actividades y sus medidas dentro de un rango de tolerancia

III. Métodos de Solución

Para abordar este problema de optimización combinatoria, que pertenece a la clase NP-duro, se proponen dos enfoques principales.

III-A. Modelo de Programación Entera

El primer método consiste en un modelo de programación entera que es resuelto utilizando el solver Gurobi. Sin embargo, debido a la complejidad computacional del problema, este enfoque no escala adecuadamente en términos de tiempo de ejecución para instancias de mayor tamaño.

III-B. Heurística Location-Allocation-Improvement

El segundo enfoque es una heurística que opera en tres fases principales:

1. **Fase de Localización**: Se determinan o fijan los centroides iniciales
2. **Fase de Asignación**: Se asignan las unidades básicas a los centroides establecidos

3. **Fase de Mejora**: Se aplica una búsqueda local que primero repara la factibilidad de la solución y posteriormente mejora su calidad siguiendo un esquema de descenso variable de vecindario

Esta técnica se basa en propiedades teóricas que, aunque no son completamente válidas para problemas con restricciones de equilibrio de múltiples actividades, se refuerzan mediante la fase de búsqueda local adicional. [3]

IV. Resultados Experimentales

El trabajo empírico incluye un estudio exhaustivo de los distintos componentes del algoritmo y la solución de instancias de gran escala. Se evalúa el impacto tanto del componente de location-allocation como de su componente de búsqueda local.

Los resultados preliminares muestran que:

- Para instancias pequeñas, Gurobi presenta una ventaja sobre la heurística en términos de calidad de solución
- Para instancias medianas y grandes, la heurística encuentra mejores soluciones que Gurobi en un tiempo considerablemente menor
- Ambos esquemas (Gurobi y la heurística propuesta) superan a la metaheurística GRASP desarrollada previamente tanto en calidad como en tiempo de ejecución. [4]

V. Conclusiones

La heurística de location-allocation-improvement propuesta demuestra ser una alternativa efectiva para resolver el problema de diseño territorial en instituciones microfinancieras, especialmente para instancias de tamaño medio y grande donde los métodos exactos no son prácticos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la SECIHTI para la realización de este trabajo.

Referencias

[1] R. Z. Ríos-Mercado and J. F. López-Pérez, "Commercial territory design planning with realignment and disjoint assignment requirements," Omega, 2013.

[2] J. F. López Pérez, T. Ekin, J. A. Jimenez, and F. A. Méndez Mediavilla, "Risk balanced territory design optimization for a micro finance institution," Journal of Industrial and Management Optimization, 2020.

[3] R. Z. Ríos-Mercado, A. M. Álvarez-Socarrás, A. Castrillón, and M. C. López-Locés, "A location-allocation-improvement heuristic for districting with multiple-activity balancing constraints and p-median-based dispersion minimization," Computers & Operations Research, 2021.

[4] R. Z. Ríos-Mercado and H. J. Escalante, "GRASP with path relinking for commercial districting," Expert Systems with Applications, 2016.

Risk-based maximal covering location problem with accessibility indicators and mobile units

1st Diego Axel Marquez Heredia
School of Engineering and Sciences
Tecnologico de Monterrey
Monterrey, Mexico
A01707739@tec.mx

2nd Linda Sofía Martínez Fantini
Strategic Planning
Universidad Anáhuac
Querétaro, Mexico
linda.martinez@anahuac.mx

3rd Fabiola Regis Hernández
École des sciences de l'administration
Université TÉLUQ
Québec, Canada
fabiola.regishernandez@teluq.ca

4th Yasmín Águeda Ríos Solís
School of Engineering and Sciences
Tecnologico de Monterrey
Monterrey, Mexico
yasmin.riossolis@tec.mx

5th Salvador de Jesús Vicencio Medina
Department of Engineering Sciences
Universidad Andres Bello
Concepción, Chile
chavachuii@gmail.com

***Abstract*—This study explores the adaptation of the Maximal Covering Location Problem (MCLP) to enhance the deployment of fixed and mobile testing centers during health crises, i.e., seasonal outbreaks, epidemics, and pandemics. It aims to optimize service accessibility by considering vulnerability factors such as comorbidities and population density at the municipal level. By integrating risk indicators into the decision-making process, this study prioritizes access to health services for vulnerable populations. This study examined the Tlaxcala case based on actual COVID-19 data from Mexico.**

***Index Terms*—Maximal Covering Location Problem (MCLP), Accessibility, Risk, Data-driven optimization, Humanitarian logistics.**

I. Introduction

The rapid emergence of seasonal and infectious diseases, especially in the wake of the COVID-19 pandemic, has highlighted the urgent need for adaptive healthcare systems that can effectively mitigate disease spread. It is crucial to implement comprehensive testing and tracking processes for positive cases, resulting in a significant demand for diagnostic tests [1]. In this situation, traditional static facility networks often struggle to ensure population accessibility to services. Consequently, mobile health units have been increasingly incorporated into healthcare infrastructure to effectively serve densely populated urban areas and remote communities [2]. However, their integration raises critical concerns regarding ensuring fair access, particularly for the most vulnerable populations.

In humanitarian settings, fairness and accessibility are intrinsically linked. It is crucial to ensure that the population has access to the necessary services while simultaneously requiring decision-makers to optimize service accessibility within the constraints of limited resources. Within the pandemic context, this challenge can be addressed by incorporating population risk profiles to ensure the fair prioritization of access to testing services.

This study was inspired by the Mexican context, where the prevalence of risk factors exacerbates respiratory diseases. According to [3], over 75% of adults are overweight or obese, contributing to the early onset of chronic diseases. Furthermore, nearly 30% of individuals over 40 years of age are hypertensive, and around 20% are diabetic. These statistics are significant, as extensive research has demonstrated that age and comorbidities, such as hypertension, diabetes, and obesity, significantly increase the likelihood of severe illness or mortality from infectious diseases. Therefore, integrating population risk indicators, such as the prevalence of comorbidities and population density, into facility location models is essential to ensure strategic access to services. At the same time, resource allocation under strict budgetary and operational constraints remains a challenge [4].

This study presents a risk data-driven approach based on the Maximal Covering Location Problem (MCLP). The proposed approach aims to support decision-makers in balancing the use of fixed healthcare facilities, such as hospitals, with the strategic deployment of mobile units. The objective is to ensure timely access for individuals at higher risk of hospitalization due to infection, as well as those vulnerable to contagion. For this study, *accessibility* is defined as the ability of the population to mobilize and reach the services provided by a medical unit or to access its emergency services [5].

The remainder of this paper is organized as follows. Section II explains the problem statement, along with the data analysis and mathematical formulation. Section III presents the computational experiments and their results. Finally, Section IV discusses the conclusions and outlines the potential directions for future research.

This work is supported by Tecnologico de Monterrey, TÉLUQ University, SECIHTI, and Mitacs GRI.

II. Problem Description

We based this study on the MCLP model [5], aiming to maximize accessibility to COVID-19 testing. To enhance the model's responsiveness to public health needs, we incorporated a risk indicator that prioritizes regions to grant access to the testing service. To achieve this, the proposed approach first calculated the risk indicator through municipal-level data analysis of population comorbidities and density, acknowledging that underlying health conditions and densely populated areas significantly impact pandemic conditions. Then, by integrating this risk factor into the MCLP optimization model, our framework enhances the population's access to limited COVID-19 tests.

A. Stage 1: Risk indicator

In this stage of our approach, we calculated the risk factor using the equation proposed by CENAPRED [6]:

$$Risk = V \times D \times P$$

where, V represents the vulnerability index of the municipality, D refers to the population density, and P denotes the probability of occurrence.

The vulnerability index was developed using the five-step methodology outlined by [7]. This methodology includes the following steps: (1) data gathering, (2) variable encoding, (3) dimensionality reduction, (4) modeling, and (5) cross-validation. Following this framework, we applied a Decision Tree machine learning algorithm to estimate a vulnerability index for each municipality. The data used for this analysis was obtained from the open-source database provided by Mexico's Epidemiological Center [8].

Population density values were acquired from INEGI [9]. Given that the pandemic was already in progress, we set the probability of occurrence to 100% (i.e., 1). This adjustment simplifies the risk factor expression to: $Risk = V \times D$

After calculating this risk factor for each municipality, we incorporated it into the decision-making process, as explained in Section II-B.

B. Stage 2: The MCLPAMU model

The second stage of the approach extends the framework introduced by [5] by explicitly incorporating a municipality-level risk index into the MCLP. In addition to traditional accessibility indicators, the model integrates the role of mobile health units, thereby enhancing flexibility in service accessibility. We preserve the decision structure for opening fixed facilities and deploying mobile units, while introducing additional parameters that reflect the prevalence of health-related risks across municipalities. The resulting mixed-integer programming formulation is designed to maximize weighted coverage objectives and prioritize the allocation of limited resources to high-risk areas.

The problem considers a set of healthcare facilities $i \in I$, which, for this study, are restricted to hospitals. For managerial decision-making, multiple municipalities belong to the same Mexican state; thus, each state is allowed to allocate up to η mobile units to any hospital i. These hospitals can then dispatch the assigned units to municipalities $j \in J$. Each municipality j is represented by its geographical centroid and risk factor β_j. Therefore, municipalities serve as potential deployment sites for mobile units, extending the effective reach of healthcare services and improving population accessibility to testing.

To do so, the model objective function (see Equation (1)) comprises four weighted elements. The first three correspond to key indicators that guide our analysis, reflecting progressively adjusted levels of risk-based prioritization. The fourth element introduces a penalty term designed to discourage redundant coverage of the same municipality, regardless of whether a hospital or a mobile unit serves it.

$$\max \sum_{j \in J} (\beta_{1j} Y_j + \beta_{2j} m_j + \beta_{3j} a_j - \gamma(\Delta_j + \Gamma_j)) \tag{1}$$

To enhance overall population coverage and prioritize the most vulnerable groups during public health emergencies, the model assigns different weights to each type of coverage, thereby prioritizing the most vulnerable groups. The first element refers to the coverage provided by a hospital, Y_j, which receives the highest weight β_{1j}, reflecting its critical role in service delivery. Here, β_{1j} is the risk factor identified in Section II-A, and Y_j is a binary variable indicating whether a municipality j is covered by a hospital ($Y_j = 1$) or not ($Y_j = 0$). The second and third elements follow this logic. The second element evaluates the coverage from a mobile unit m_j, weighted by $\beta_{2j} = \frac{\beta_{1j}}{2}$, acknowledging its complementary yet more limited capacity. The third element corresponds to service network indicator a_j, weighted by $\beta_{3j} = \frac{\beta_{2j}}{2}$, which represents an additional but less significant contribution to the objective function. This indicator accounts for all municipalities within coverage or accessibility in the network. Finally, to minimize redundant coverage and overlapping service, we introduce auxiliary variables Δ_j and Γ_j, which represent, respectively, the number of fixed and mobile resources covering municipality j. The parameter γ imposes a penalty on overlapping services, thereby enabling the model to achieve a balance between coverage and accessibility while fostering an equitable distribution of resources.

The problem is subject to four types of constraints. The *first group* defines the general conditions for selecting which hospitals to open and determining the deployment of the mobile units.

$$\sum_{i \in I} z_i \leq \rho |I| \tag{2}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in J} q_{ik} \leq \eta \qquad i \in I \tag{3}$$

$$q_{ik} = 0 \qquad \forall i \in I, \forall k \in J \wedge d_{ik} \geq \Omega \tag{4}$$

Constraints (2) ensure that only a percentage (ρ) of all available hospitals are used for COVID-19 testing. The same logic applies to constraint (3), which ensures that only η mobile units can be deployed. Finally, constraints (4) ensure

that a mobile unit can be deployed at a maximum Ω km from the hospital.

The *second group* determines the municipalities that are covered. Indeed, Equation (5) specifies the municipalities covered by a hospital, and Equation (6) identifies those covered by a mobile unit.

$$Y_i \leq \sum_{\substack{i \in I \\ j \in C_i}} z_i \quad \forall j \in J \tag{5}$$

$$m_j \leq \sum_{i \in I} \sum_{k \in J} L_{jk} q_{ik} \quad \forall j \in J \tag{6}$$

The *third group* of constraints establishes which municipalities have access to the service. A municipality is considered in the service network if it has access by a hospital (Y'_j) or a mobile unit (m'_j) denoted by a_j. To formalize this, we introduce the auxiliary variables Y'_j and m'_j, which jointly determine the municipalities in the ratio of accessibility of $d_{ij} \leq \Theta$.

$$Y'_i \leq \sum_{i \in B_j} z_i \quad \forall j \in J \tag{7}$$

$$m'_j \leq \sum_{i \in I} \sum_{k \in J} H_{jk} q_{ik} \quad \forall j \in J \tag{8}$$

$$a_j \leq Y'_j + m'_j \quad \forall j \in J \tag{9}$$

Finally, the *fourth group* includes constraints that introduce the auxiliary variables Δ_j and Γ_j that discourage coverage or accessibility overlap and promote the extension of service coverage to other municipalities.

$$\sum_{k \in J} L_{jk} q_{ik} + \sum_{\substack{i \in I \\ j \in C_i}} z_i = 1 + \Delta_j \quad \forall j \in J \tag{10}$$

$$\sum_{k \in J} q_{ik} H_{jk} + \sum_{i \in B_j} z_i = 1 + \Gamma_j \quad \forall j \in J \tag{11}$$

Equation (10) quantifies the total number of resources (fixed or mobile) covering municipality j, whereas Equations (11) apply the same logic for accessibility.

Table I shows the complete list of sets, parameters, and decision variables.

TABLE I
SETS, PARAMETERS, AND DECISION VARIABLES OF THE MODEL.

SETS	
$i \in I$	set of hospitals
$j \in J$	set of municipalities
C_i	subset of municipalities j covered by a hospital i. The hospital is located within $d_{ij} \leq \tau$
B_j	subset of hospitals accessible to municipality j. The hospital i is located within $d_{ij} \leq \Theta$ from a municipality j
PARAMETERS	
τ	coverage radius
Θ	accessibility radius
γ	cost to duplicate the coverage or accessibility to a municipality
d_{ij}	distance in km between a hospital i and a mobile unit located in j
L_{jk}	binary matrix that takes the value of 1 if municipality j is covered by k within $d_{ij} \leq \tau$
H_{jk}	binary matrix that takes the value of 1 if municipality j has access to mobile unit located in k within $d_{ij} \leq \Theta$
DECISION VARIABLES	
z_i	binary variable that takes the value of 1 if the hospital i is defined as a COVID-19 facility; 0 otherwise
q_{ij}	binary variable that takes the value of 1 if the hospital i assigns a mobile unit to municipality j; 0 otherwise
Y_j	binary variable that takes the value of 1 if municipality j is covered by at least one hospital (i.e., exists i such that $d_{ij} \leq \tau$ and hospital i is active)
m_j	binary variable that takes the value of 1 if municipality j is covered by at least one mobile unit
a_j	binary variable that takes the value of 1 if the municipality j is located within a resource's (hospital or mobile unit) network (i.e., $d_{ij} \leq \Theta$)
Y'_j	auxiliary binary variable representing accessibility to a hospital
m'_j	auxiliary binary variable representing accessibility to a mobile unit
Δ_j	auxiliary integer variable that represents the number of resources that cover a municipality j
Γ_j	auxiliary integer variable that represents the number of resources that are accessible to a municipality j

III. EXPERIMENTS AND RESULTS

We evaluated the proposed approach using the state of Tlaxcala in Mexico, chosen due to its diverse population distribution and healthcare challenges. Tlaxcala has four general hospitals and a population of 1,342,977, which is spread across 60 municipalities [9]. Of these hospitals, only $\rho = 50\%$ were available for COVID-19 services. To account for the limited resources, we included six mobile units $\eta = 6$ in our analysis.

The model's performance was evaluated by examining two primary indicators: the municipal risk level it mitigates and the robustness of the service network. Additionally, the analysis encompasses three scenarios that are used to contextualize the findings further.

- Scenario 1: This scenario focuses solely on population coverage, ignoring vulnerability indicators. For the service, accessibility indicators and the utilization of mobile units were considered.
- Scenario 2: This scenario considers indicators for municipal risk and mobile unit resources, neglecting the accessibility indicator.
- Scenario 3: This scenario includes indicators for municipal risk and accessibility, limiting available resources exclusively to hospitals.

The optimization model was implemented in Python using Pyomo and solved using the commercial solver CPLEX 22.1.1.0. All tests were performed on a macOS Sequoia 15.0.1 system equipped with eight cores and 8 GB of RAM.

A. Results

The results are summarized in Table II. The table presents the performance indicators under analysis. Indeed, we separated the performance indicators in terms of service level and the risk that was mitigated. To evaluate the impact of incorporating the risk indicator, we classified municipalities into four risk levels based on quartiles: level 1 (low risk, 25%) to level 4 (high risk, 75%). The table presents the percentage

TABLE II
POPULATION COVERAGE AND RISK DISTRIBUTION BY SCENARIO

Performance indicator	**Proposed approach**	**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**
% population with access to the service	**63.15**	61.71	43.67	49.18
% population covered by a hospital	**34.02**	**34.02**	35.16	**34.02**
% population covered by a mobile unit	12.19	**12.98**	8.51	0.00
% municipalities R_4	**76.00**	**76.00**	40.50	51.60
% municipalities R_3	**91.20**	**91.20**	81.20	80.50
% municipalities R_2	**8.70**	6.10	0.80	5.30
% municipalities R_1	12.40	12.50	**15.20**	12.40

of municipalities in each risk category that have access to the service, where R_4 indicates the highest risk level and $R1$ the lowest.

As shown in Table II, the proposed approach outperformed the alternative scenarios across most performance indicators. Overall, it provides service access for 63.15% of the population, comprising 34.02% through hospitals, 12.19% via mobile units, and 16.94% of the population having accessibility to the service. This represents the highest performance in most metrics, except for coverage provided by mobile units, where Scenario 1, which considers only population coverage without accounting for risk, achieves 0.79% higher coverage than the proposed solution.

In addition, the model prioritizes vulnerable groups, covering 76.00% of municipalities at the highest risk level (R_4) and 91.20% at level R_3. In this instance, the percentages for R_4 and R_3 are identical to those of Scenario 1, reflecting the small size of the instance. However, even in this limited setting, our model achieves 2.6% greater coverage of municipalities at risk level R_2 compared to Scenario 1.

These results confirm that jointly incorporating risk, accessibility, and mobile resources not only increases overall coverage but also systematically prioritizes the most vulnerable populations during health crises. In particular, the results show that omitting risk and accessibility diminishes the system's ability to prioritize vulnerable groups. The integrated model delivers the most balanced performance, whereas hospital-only strategies leave several municipalities without viable access.

IV. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

This study introduces MCLPAMU, a multicriteria optimization model designed to enhance the deployment of fixed and mobile testing centers during health crises. By integrating comorbidity and population density data at the municipal level, the model maximizes coverage in high-risk areas. To assess its performance, we analyzed three scenarios considering (i) population coverage, accessibility, and mobile unit deployment; (ii) risk indicators and mobile unit deployment; and (iii) risk and accessibility indicators with hospitals as the sole resources. The results demonstrate that MCLPAMU, by jointly incorporating risk, accessibility, and mobile resources, not only improves overall coverage but also systematically prioritizes vulnerable populations. In contrast, approaches that omit risk and accessibility significantly reduce the system's capacity to reach high-risk groups, while hospital-only strategies leave many municipalities without viable access. Future work will extend the model's applicability to larger instances and incorporate seasonal disease dynamics, economic trade-offs, and capacity constraints, thereby strengthening its robustness and adaptability for real-world decision-making.

REFERENCES

[1] L. P. Guaman-Bautista, E. Moreta-Urbano, C. G. Oña-Arias, M. Torres-Arias, N. C. Kyriakidis, K. Malcı, N. Jonguitud-Borrego, L. Rios-Solis, E. Ramos-Martinez, A. López-Cortés, and C. Barba-Ostria, "Tracking SARS-CoV-2: novel trends and diagnostic strategies," *Diagnostics*, vol. 11, no. 11, p. 1981, 2021, doi: 10.3390/diagnostics11111981.

[2] E. Bayraktar, F. Bulut, and S. Johnson, "Relief aid provision to en route refugees: Multi-period mobile facility location with mobile demand," *European Journal of Operational Research*, vol. 301, no. 2, pp. 708–725, 2022, doi: 10.1016/j.ejor.2021.11.011.

[3] L. Domínguez-Ramírez, F. Sosa-Jurado, G. Díaz-Sampayo, I. Solis-Tejeda, F. Rodríguez-Pérez, R. Pelayo, G. Santos-López, and P. Cortes-Hernandez, "Age and comorbidities as risk factors for severe COVID-19 in Mexico, before, during and after massive vaccination," *Vaccines (Basel)*, vol. 11, no. 11, p. 1676, Nov. 2023, doi: 10.3390/vaccines11111676.

[4] L. S. Martínez-Fantini, *A two-phase optimization model that considers risk and accessibility for vaccine allocation and health-care units location*, Master's thesis, Tecnológico de Monterrey, School of Engineering and Sciences, Monterrey, Mexico, 2021.

[5] S. J. Vicencio-Medina, Y. A. Ríos-Solís, O. J. Ibarra-Rojas, N. M. Cid-García, and L. Ríos-Solís, "The maximal covering location problem with accessibility indicators and mobile units," 2023. Dataset available at: https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20460867.v3.

[6] M. Á. Cruz-Pliego, and Atlas Nacional de Riesgos, "Conceptos básicos y guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos," 2022. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/727155/TEMA_1_ANR.pdf

[7] L. Martínez-Fantini, F. Regis-Hernández, and I. Mora-Ochomogo, "A prediction model to determine a COVID-19 patient's outcome based on its risk factors," in Humanitarian Logistics from the Disaster Risk Reduction Perspective, F. Regis-Hernández, J. Mora-Vargas, D. Sánchez-Partida, and A. Ruiz, Eds. Springer, Cham, 2022, pp. 221–234, doi: 10.1007/978-3-030-90877-5_13.

[8] Secretaria de Salud, "Datos abiertos Direccion General de Epidemiología.gob.mx," 2021. [Online]. Available: https://www.gob.mx/salud/documentos/datos-abiertos-152127

[9] INEGI, *2020 Population and Housing Census*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Mexico, 2020. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Un Modelo de Dos Etapas de Localización con Inventarios para el Diseño Resiliente de la Red de la Cadena de Suministros

1st Francisco J. Tapia-Ubeda
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
francisco.tapia@ucn.cl

2nd Pablo A. Miranda-González
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
pablo.miranda@ucn.cl

3rd Elias Olivares-Benitez
Facultad de Ingeniería
Universidad Panamericana
Zapopan, México
eolivaresb@up.edu.mx

4th Juan Pablo Peralta-González
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
juan.peralta@ce.ucn.cl

***Abstract*—El diseño de la red de la cadena de suministros debe ser resiliente, especialmente considerando el posible impacto de eventos disruptivos sobre la operación en término de, por ejemplo, costos, tiempos, y nivel de servicio. Esta investigación se centra en la integración de resiliencia en el diseño de la red de la cadena de suministros basándose en la estructura típica de los problemas de localización con inventario. Los eventos disruptivos considerados inhabilitan temporalmente un conjunto de bodegas, sin generar pérdida del inventario en la bodega. Por lo mismo, se propone un modelo de localización con inventarios de dos etapas. Dada la estructura del modelo presentado, se propone un enfoque de resolución basado en la Descomposición Generalizada de Benders. Los resultados demuestran la potencialidad del modelo y que utilizando el enfoque propuesto se puede alcanzar optimalidad en todas las instancias testeadas.**

***Index Terms*—Localización con Inventarios, Programación Estocástica, Descomposición Generalizada de Benders, Resiliencia**

I. Introducción y Revisión Bibliográfica

De entre todas las decisiones relacionadas con la gestión de la cadena de suministro, las decisiones de diseño de la red se tornan centrales considerando que tradicionalmente impactan en el largo plazo y por los costos asociados. Además, dependiendo de estas decisiones se puede condicionar significativamente diversas medidas de desempeño significativas [1], [2], [3], [4].

El diseño de la cadena de suministro es uno de los problemas estratégicos más relevantes y se enfoca en optimizar decisiones de localización (e.g., plantas, bodegas) y el cómo estas se conectan con los diferentes actores de la misma (e.g., proveedores, clientes) [5], [6], [7], [8].

En este ámbito, se encuentran los modelos de localización con inventarios que tradicionalmente integran decisiones estratégicas de localización con decisiones tácticas de inventarios [2]. Estos modelos son más complejos que sus versiones que no consideran inventarios y por lo mismo requieren de enfoques de resolución efectivos y eficientes para lidiar con la complejidad de los modelos resultantes. De entre los enfoques utilizados a través de los años, la Descomposición Generalizada de Benders [9] se ha posicionado como una herramienta útil para hacer frente a la complejidad de los modelos en tiempos razonables y asegurando optimalidad [10], [11], [12].

Ahora, para gestionar adecuadamente las cadenas de suministro, sobretodo las globales, se debe saber afrontar la ocurrencia de eventos de baja probabilidad, pero de alto impacto conocidos como eventos disruptivos [13], [14]. Así, se debe saber a priori las decisiones que se deben tomar en caso de la ocurrencia de cualquier evento que perturbe la operación del sistema [15], [16].

El resto del documento se organiza como sigue. La sección II considera la definición del problema abordado y muestra el modelo matemático de dos etapas propuesto. La sección III se enfoca en mostrar el diseño de experimento, las características computacionales y los resultados preliminares obtenidos. Finalmente, la sección IV muestra las conclusiones y el trabajo futuro.

II. Definición del Problema y Modelo Propuesto

El problema considera un conjunto conocido y fijo de proveedores y clientes finales. Se debe decidir qué bodegas se deben instalar y cuáles clientes atenderán. Además, se debe dimensionar el inventario que cada bodega localizada deberá mantener considerando una política de control de inventario de revisión continua (s,Q). Los eventos disruptivos inhabilitan la operación de un conjunto de bodegas temporalmente. Ahora bien, se asume que la ocurrencia de los eventos no genera la pérdida del inventario almacenado en las bodegas afectadas.

El modelo matemático propuesto considera un conjunto conocido de clientes M, un conjunto de sitios potenciales para instalar bodegas N y el conjunto de eventos disruptivos W. La función objetivo (1) del modelo minimiza los costos esperados de localización de bodegas ($f1_i$), asignación de clientes a bodegas ($f2_{ij}$) y los inventarios que se mantienen en las bodegas instaladas ($f3_i$).

Variables de Decisión:

- X_i : Variable binaria que vale 1 si se instala la bodega i
- Y_{ijw} : Variable binaria que toma el valor de 1 si es que la bodega i atiende al cliente j en el escenario w
- D_{iw} : Media de la demanda percibida por la bodega i en el escenario w
- V_{iw} : Varianza de la demanda percibida por la bodega i en el escenario w

En base a esto, el modelo propuesto es como sigue:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} f1_i + \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} f2_{ij} + \sum_{i \in N} f3_i \tag{1}$$

s.t.:

$$\sum_{i \in N} Y_{ijw} = 1 \qquad \forall i \in N, \forall w \in W \tag{2}$$

$$Y_{ijw} \leq X_i \qquad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall w \in W \tag{3}$$

$$X_i \leq \sum_{jinM} Y_{ijw} \qquad \forall i \in N, \forall w \in W \tag{4}$$

$$D_{iw} = \sum_{j \in M} Y_{ijw} \cdot d_j \qquad \forall i \in N, \forall w \in W \tag{5}$$

$$V_{iw} = \sum_{j \in M} Y_{ijw} \cdot v_j \qquad \forall i \in N, \forall w \in W \tag{6}$$

$$X_i \in \{0,1\} \qquad \forall i \in N \tag{7}$$

$$Y_{ijw} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall w \in W \tag{8}$$

Los conjuntos de restricciones se componen de las restricciones tradicionales de los modelos de localización de instalaciones (2)-(4), (7) y (8) las restricciones que modelan el proceso de demanda (5) y (6).

III. Resultados Preliminares

El modelo asume la política de control de inventario de revisión continua (s, Q) como en [12] y [11]. Dada la complejidad y estructura del modelo, se propone un enfoque de resolución basado en la Descomposición Generalizada de Benders, donde las variables binarias (de primera y segunda etapa) se consideran como variables complicantes y las variables de inventario (de primera y segunda etapa) como variables no-complicantes. Se considera una instancia base con 20 clientes ($|M|$=20) y 10 sitios potenciales ($|N|$=10) generada aleatoriamente en un espacio cuadrado de 200[km] de lado. En base a esta instancia se generaron 8 sub-instancias. Para cada una de ellas, se considera un problema de localización de localizaciones tradicional, como problema auxiliar, para encontrar la primera solución del enfoque de resolución. En todos los casos, como el subproblema resultante es siempre factible, se tiene que el enfoque de resolución sólo debe integrar iterativamente cortes de optimalidad. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla a continuación.

TABLE I
Tabla Resultados Instancia Base 1

			nC			
			5	10	15	20
nW	5	OF [$]	22.635.967,172	27.438.741,171	31.121.243,526	37.248.584,720
		Time [s]	0,355	0,886	0,743	1,236
		nIT	12	9	6	6
		nLW	2	2	2	2
	10	OF [$]	21.262.988,410	26.186.723,668	30.215.093,157	33.787.717,543
		Time [s]	29,971	132,281	229,395	331,644
		nIT	47	47	45	38
		nLW	2	2	2	2

Es valioso señalar que, para las pruebas mostradas, se asume que un evento disruptivo afecta sólo una sitio potencial para la localización de bodegas.

La Fig. 1 muestra la configuración inicial (obtenida con el problema auxiliar) y la configuración óptima para la subinstancia con 10 clientes y 10 sitios potenciales para localizar bodegas. En este caso se nota claramente el impacto del efecto $RiskPooling$.

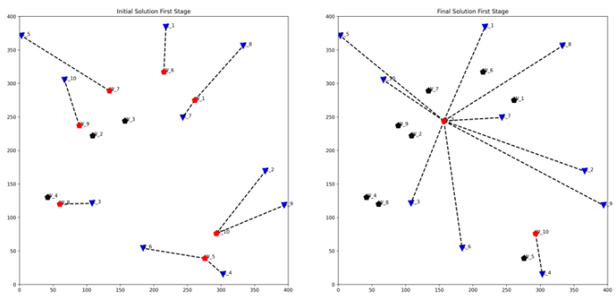


Fig. 1. Configuración inicial y final instancia $|N|$=10 y $|M|$=10

Ahora, la Fig.2 se muestra la convergencia para la instancia antes mostrada, en donde en 47 iteraciones se alcanza el óptimo.

Los resultados actuales muestran claramente el potencial del uso del modelo propuesto en contextos industriales reales ya que es capaz de encontrar una solución eficiente que permite adelantarse a la ocurrencia de eventos disruptivos. Particularmente, dado que en los eventos considerados se cierra a lo más una bodega (puede que el evento afecte sitios donde no se instalan bodegas) la solución óptima requiere de al menos dos bodegas instaladas, ya que se exige que siempre los clientes deben ser atendidos. En otras palabras, como los clientes no pueden quedar sin atención, y si los eventos afectan n sitios potenciales, se requieren de al menos (n+1) bodegas instaladas en la solución óptima.

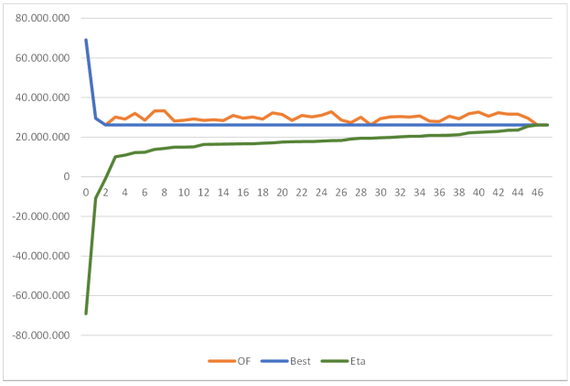


Fig. 2. Convergencia instancia $|N|$=10 y $|M|$=10

IV. Conclusiones y Trabajo Futuro

La gestión de la cadena de suministro considera diferentes decisiones que abarcan tradicionalmente desde la adquisición de materias primas hasta la distribución a los clientes finales. Incluso considerando las decisiones asociadas a la logística inversa para su funcionamiento sostenible, las decisiones de diseño de la red de la cadena de suministros se consideran centrales dado su impacto en el largo plazo y que normalmente conllevan grandes costos asociados.

Además, especialmente en cadenas de suministro globales, es esencial poder asegurar una continuidad operacional que no afecte las medidas de desempeño globales, e.g., costos, nivel de servicio, tiempos. En este contexto es crucial el saber qué hacer en caso de la ocurrencia de eventos disruptivos afectando la operación a distintos niveles. Particularmente, esto se puede alcanzar mediante la integración de aspectos de resiliencia en los procesos de toma de decisiones.

En el contexto del diseño de la red de la cadena de suministro, la integración de aspectos que propendan a la resiliencia de la operación se pueden traducir en saber a priori qué hacer en caso de la ocurrencia de eventos disruptivos. En otras palabras, saber cómo proceder de manera de poder retomar un estado aceptable de operación con posterioridad a la ocurrencia de un evento considerado como indeseable.

El modelo propuesto considera el determinar la configuración de la red, en términos de localizaciones y asignaciones de bodegas y clientes. Así, se puede tener claridad del plan de acción en el momento que ocurre una disrupción.

El modelo matemático representa una herramienta eficaz para apoyar los procesos de toma de decisiones en diversos contextos industriales. Adicionalmente, el enfoque de resolución se comprueba como una estrategia que permite enfrentar de manera efectiva y eficiente la complejidad matemática.

Se debe avanzar en experimentos con diversas instancias, en término de tamaños y configuraciones, de manera de corroborar el desempeño del enfoque de resolución y la pertinencia del modelo maatemático. Además, es posible avanzar en términos de integrar aspectos multiproductos, multiperidos, capacidades, entre otros aspectos relevantes para el proceso de toma de decisiones.

References

[1] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda, I. Roda, M. Macchi, and O. Durán, "Modelling and solving spare parts supply chain network design problems," *International Journal of Production Research*, vol. 58, pp. 5299–5319, sep 2020.

[2] R. Z. Farahani, H. Rashidi Bajgan, B. Fahimnia, and M. Kaviani, "Location-inventory problem in supply chains: A modelling review," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 12, pp. 3769–3788, 2015.

[3] P. A. Miranda and R. A. Garrido, "Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 40, no. 3, pp. 183–207, 2004.

[4] M. S. Daskin, C. R. Coullard, and Z. J. M. Shen, "An inventory-location model: Formulation, Solution Algorithm and Computational Results," *Annals of Operations Research*, vol. 110, no. 1-4, pp. 83–106, 2002.

[5] L. Ozsen, C. R. Coullard, and M. S. Daskin, "Capacitated warehouse location model with risk pooling," *Naval Research Logistics*, vol. 55, pp. 295–312, jun 2008.

[6] J. J. Coyle, E. J. Bardi, and C. J. Langley, *The management of business logistics: a supply chain perspective*. South-Western/Thomson Learning, 2003.

[7] M. Mourits and J. J. Evers, "Distribution network design An integrated planning support framework," *International Journal of Physical Distribution Logistics Management*, vol. 25, pp. 43–57, jun 1995.

[8] M. S. Daskin, *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley Sons, Inc., apr 1995.

[9] A. M. Geoffrion, "Generalized Benders decomposition," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 10, pp. 237–260, oct 1972.

[10] L. Olivares-Alvarez, P. A. Miranda-Gonzalez, F. J. Tapia-Ubeda, and S. Cannella, "The inventory location problem under periodic inventory control policy (R, S): modeling, solving and analysis," *Optimization and Engineering 2025*, pp. 1–73, mar 2025.

[11] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda-Gonzalez, and G. Gutiérrez-Jarpa, "Integrating supplier selection decisions into an inventory location problem for designing the supply chain network," *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 47, pp. 1–56, mar 2024.

[12] F. J. Tapia-Ubeda, P. A. Miranda, and M. Macchi, "A Generalized Benders Decomposition based algorithm for an inventory location problem with stochastic inventory capacity constraints," *European Journal of Operational Research*, vol. 267, no. 3, pp. 806–817, 2018.

[13] D. Ivanov, B. Sokolov, and A. Dolgui, "The Ripple effect in supply chains: Trade-off 'efficiency-flexibility- resilience' in disruption management," *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 7, pp. 2154–2172, 2014.

[14] R. Bhamra, S. Dani, and K. Burnard, "Resilience: The concept, a literature review and future directions," *International Journal of Production Research*, vol. 49, no. 18, pp. 5375–5393, 2011.

[15] B. Du, H. Zhou, and R. Leus, "A two-stage robust model for a reliable p-center facility location problem," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 77, pp. 99–114, 2020.

[16] K. Zhao, K. Scheibe, J. Blackhurst, and A. Kumar, "Supply Chain Network Robustness Against Disruptions: Topological Analysis, Measurement, and Optimization," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 66, no. 1, pp. 127–139, 2019.

Session N°5 – Track N°1

Doctoral Theses

Chair: Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*
Place: X-103
Time: 08:30 – 09:45

Optimization Under Uncertainty for the Management of Hydroelectric Resources

Time: 08:30 – 08:45
Author: Favereau, M. *(Universidad de los Andes)*

Accelerated Non-Euclidean Methods for Fixed-Points of Nonexpansive Maps and Optimal Transport Problems

Time: 08:50 – 09:05
Author: Contreras, J. *(Universidad Diego Portales)*

Blockchain for Sustainable Agri-Food: A Bi-Objective Optimization and Barrier Analysis

Time: 09:10 – 09:25
Authors:

- Derakhti, A. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Santibañez-González, E. *(Universidad de Talca)*

Optimization under uncertainty for the management of hydroelectric resources

1st Marcel Favereau
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Andes, Chile
Santiago, Chile
mjfavereau@uandes.cl

***Abstract*—The management of hydroelectric resources is a key challenge for power systems, especially in contexts of water scarcity and climate change. This thesis develops optimization under uncertainty models that integrate robust and stochastic programming with advanced statistical forecasting, applied to the Chilean hydroelectric network. Five contributions are presented: a robust streamflow forecasting model, a multistage adaptive robust optimization model for hydrothermal scheduling, a stochastic programming model with short-term operational effects, an integrated approach for multipurpose reservoir management, and a bibliometric review of water resources management. Results show improvements in forecast accuracy, system reliability, water valuation, and cross-sector coordination, contributing to sustainable resource use and aligned with Sustainable Development Goals 6, 7, and 13.**

***Index Terms*—Optimization under Uncertainty, Hydrothermal Scheduling, Streamflow Forecasting, Water-Energy Nexus, Hydroelectric Resources Management.**

I. Introduction

Hydroelectric generation management is considered a fundamental problem in power system operation, where operations research has made significant contributions to decision-making. One of the most significant challenges is that current decisions regarding the storage and use of water resources impact future decisions. Additionally, this problem presents another important challenge associated with the uncertain nature of hydro inflows, which is becoming even more complex today due to the consequences of climate change. Thus, this thesis proposes the development of optimization under uncertainty models to support medium- and long-term planning of hydrothermal system operations.

First, this thesis proposes the development of a statistical model that represents the random behavior of hydro inflows in multinodal and multireservoir hydrothermal systems. The purpose is to capture statistical aspects such as trend, seasonality, spatio-temporal correlation, asymmetry, and multiple modes present in historical hydrological data through the use of vector autoregressive models and variational inference algorithms. This proposal contributes to the literature with the paper "*Robust streamflow forecasting: A student's t-mixture vector autoregressive model*" [1].

This work was supported by ANID-PFCHA/National Doctorate Program/2019-21190693, ANID-FONDEF-IT19I0113, ANID-FSEQ210018.

In the second part, a risk-averse optimization model under uncertainty is proposed, incorporating the previously proposed statistical methodologies for medium-term operation of hydrothermal systems. The primary objective is to determine an optimal generation policy that can operate efficiently under the most unfavorable realizations of future hydrological trajectories. This proposal contributes to the literature with the paper "*Multistage adaptive robust optimization for the hydrothermal scheduling problem*" [2].

The third stage involves developing optimization models under uncertainty that support long-term energy planning and operational processes. The idea is to analyze the role of water in interactions with other productive sectors, such as agriculture, thereby improving the efficiency of resource use. This tool will also enable the anticipation of future phenomena, such as the penetration of new technologies, regulatory changes in the use of water resources, or their low availability, and the impacts these would have on resource management for different users. This proposal contributes to the literature with the paper "*Medium-term stochastic hydrothermal scheduling with short-term operational effects for large-scale power and water networks*" [3] and "*Evaluation of operation policies in multipurpose reservoirs focused on zonal agriculture and large-scale electric power systems*" [4], [5].

Finally, the paper "*Water resources management: A bibliometric analysis and future research directions*" [6] extends our previous work "*Challenges in the management of hydroelectric generation in power system operations*" [7], proposing a significant contribution based on a tutorial-type review of water resources management over the past decades, highlighting the evolution of the literature in this field. It further includes a bibliometric analysis to map the distribution of published works, leading topics, prominent authors, and trends over time. This review not only offers in-depth insights into water management issues but also identifies directions for future research.

In summary, this doctoral research contributed to advancing the state of the art in optimization under uncertainty for hydroelectric resource management. It does so through five complementary contributions: (i) a robust statistical forecasting model, (ii) a multistage adaptive robust optimization framework, (iii) a stochastic scheduling model with operational effects, (iv) an integrated approach for multipurpose reservoirs,

and (v) a bibliometric review mapping three decades of research. These contributions are detailed in Sections II to VI, while their general conclusions are discussed in Section VII.

II. Robust streamflow forecasting: A Student's t-mixture vector autoregressive model

Accurate streamflow forecasting is a primary challenge in reservoir management, where autoregressive models are commonly employed. Typically, the noise of these models is considered Gaussian. However, this assumption can overestimate the presence of outliers, which are commonly observed in real-world water inflow data. Motivated by this, we propose a novel streamflow forecasting method by modeling the noise of a vector autoregressive model as a multivariate Student's *t*-mixture based on the use of the variational expectation-maximization algorithm. The proposed model is able to capture the trend, seasonality, and spatio-temporal correlations of hydro inflows, along with both asymmetry and multimodal features of the vector autoregressive process' residuals. Based on 12 of the main inflows of the Chilean hydroelectric network, our experiments demonstrate the proposed model's efficiency and improvements in forecasting medium- to long-term inflows compared to a classical vector autoregressive model. Results show that the expected forecasts are improved with the proposed model, and the predictive distributions present tighter intervals, as measured by standard and state-of-the-art metrics.

III. Multistage adaptive robust optimization for the hydrothermal scheduling problem

The current water scarcity faced by many countries increases the need to consider an appropriate representation of future hydro inflows in power system operation and planning models. Hydrothermal scheduling is a problem that seeks to utilize the water stored in reservoirs over time to find an optimal dispatch policy between hydro and thermal power plants. Due to the inherent randomness of water inflows and the intertemporal decision process, this problem has typically been approached through multistage stochastic optimization, which minimizes the total expected operational cost over the entire planning horizon. However, this approach has some practical disadvantages. Among the main ones we highlight (i) the complexity of balancing the statistical representativeness of the stochastic processes and the computational efficiency of the optimization model; (ii) the need to employ computationally intensive decomposition methods for its solvability; and (iii) the need to carry out network simplifications to tackle tractability issues arising in large networks. As an alternative, we propose a multistage adaptive robust optimization model for the hydrothermal scheduling problem. Robust optimization is useful to prevent the previous disadvantages because it does not make any distributional assumption and it works with the so-called uncertainty sets instead of carrying out sampling processes. In particular, we propose an efficient formulation based on linear decision rules and vector autoregressive models to represent the uncertainty in hydro inflows. Our experiments, based on the Chilean electric power system with hundreds of hydro nodes and connections, demonstrate the proposed model's efficiency for large-scale systems and provide insights into the adequate balance between cost-effectiveness and reliability that robust optimization models guarantee.

IV. Medium-term stochastic hydrothermal scheduling with short-term operational effects for large-scale power and water networks

The high integration of variable renewable sources in electric power systems entails a series of challenges inherent to their intrinsic variability. A critical challenge is to accurately value the water available in reservoirs within hydrothermal systems, considering the flexibility it provides. In this context, this paper proposes a medium-term, multistage stochastic optimization model for the hydrothermal scheduling problem, solved using the stochastic dual dynamic programming algorithm. The proposed model incorporates operational constraints and simplified mathematical expressions of relevant operational effects, enabling a more informed assessment of water value by considering, among other factors, the flexibility necessary for system operation. In addition, the hydrological uncertainty in the model is represented by a vector autoregressive model, which allows capturing spatio-temporal correlations between the different hydro inflows. A calibration method for the simplified mathematical expressions of operational effects is also proposed, which allows a detailed short-term operational model to be correctly linked to the proposed medium-term linear model. Through extensive experiments for the entire Chilean power system, the results show that the difference between the expected operating costs of the proposed medium-term model, and the costs obtained through a detailed short-term operational model was only 0.1%, in contrast to the 9.3% difference obtained when a simpler base model is employed. This shows the effectiveness of the proposed approach. Furthermore, this difference is also reflected in the estimation of water value, which is crucial in water shortage situations.

V. Evaluation of operation policies in multipurpose reservoirs focused on zonal agriculture and large-scale electric power systems

Climatic phenomena, particularly hydrological droughts, have led to significant changes in reservoir operation strategies. Multipurpose reservoir operations are crucial for effectively managing stored water resources to support various activities, including electricity generation and agricultural irrigation. Despite considerable efforts to support decision-making for each economic activity, there remains a weak integration across these sectors in joint analyses. To address this, an integrated approach combining a model of a large power system and a model at the basin scale is proposed to analyze the operation of both power and agricultural systems. This approach enables the evaluation of the operating policies of a multipurpose reservoir and its performance at both local and regional scales under

various hydrological scenarios. A modification is implemented whereby the priority of water extraction to agricultural users is increased. Its effects are assessed for different hydrological trajectories in a case study of the Laja Lake basin in southern Chile, the largest Chilean basin with a capacity of up to 5,500 Hm^3. The Laja Lake, a multipurpose reservoir with substantial hydroelectric generation capacity and extensive agricultural areas plays a crucial role in the operation of the national power system. Based on an analysis of 2025, it is demonstrated that hydrological changes have a direct impact on electrical and agricultural performance. Drought conditions increase thermal generation, costs, emission intensity, and water deficits. Furthermore, the policy modification reveals tradeoffs between the power sector's emissions and agricultural water deficits. For drier scenarios, increasing agricultural extraction priority results in low additional operational costs and emissions from the power system, which supports the adoption of a policy aligned with net-zero objectives.

VI. Water resources management: A bibliometric analysis and future research directions

The stochastic dual dynamic programming (SDDP) algorithm, introduced by Pereira and Pinto in 1991 [8], has sparked significant research in the context of water resources management, primarily due to its ability to address large-scale multistage stochastic problems. This paper extends the work of Lorca, Favereau, and Olivares (2020) [7], aiming to provide a review of 32 years of research since the publication of the SDDP algorithm. A systematic academic literature search identified 174 scientific papers on water resource management published in 96 different journals. A bibliometric analysis is conducted to identify the primary methods employed in addressing this type of problem and to determine recent and future research trends. Our analysis reveals that stochastic dynamic programming, initially the most widely used approach, has now been replaced by multistage stochastic programming. Risk-averse and robust approaches are also gaining strength in recent years due to uncertainty related to climate change. Water inflows have been the primary source of uncertainty considered in the literature, followed by factors such as electricity demand, electricity prices, fuel costs, and renewable energy availability. In addition, as computational capacity continues to increase, aspects of nonlinearities, disaggregated networks, and different water management strategies are increasingly considered to make modeling more realistic. This work suggests that there is still a need for tractable stochastic optimization models for large-scale power and water systems that address multiple sources of uncertainty and nonlinearity approximations.

VII. General conclusions

This doctoral research addresses key challenges in water resources management and hydroelectric generation through five complementary contributions. The work advances robust streamflow forecasting, multistage adaptive robust optimization, stochastic hydrothermal scheduling with operational effects, integrated multipurpose reservoir management, and a bibliometric review that identifies emerging research directions. Collectively, these contributions provide both methodological innovations and practical tools for the sustainable and efficient utilization of water and energy resources.

The thesis shows that robust statistical models enhance inflow forecasting, that adaptive robust optimization can ensure reliability in large-scale hydrothermal systems, and that medium-term stochastic hydrothermal scheduling with operational effects reduces the gap between planning and real operation. It also demonstrates that integrated approaches can balance water demands between energy and agriculture under scarcity, and that future progress requires addressing additional uncertainties, nonlinearities, and computational scalability.

Together, these contributions advance knowledge and practice in the water–energy nexus, offering tools for sustainable resource use in changing hydrological contexts. The thesis aligns strongly with the United Nations Sustainable Development Goals (SDG): (i) SDG 6 (Clean Water and Sanitation), by promoting responsible water use; (ii) SDG 7 (Affordable and Clean Energy), by improving hydro system efficiency; and (iii) SDG 13 (Climate Action), by developing adaptation strategies for climate impacts.

Ultimately, this doctoral research consolidates optimization under uncertainty as a cornerstone for the future development of decision-support tools, offering a foundation upon which more adaptive, scalable, and climate-resilient hydrothermal management strategies can be built.

References

[1] M. Favereau, Á. Lorca, M. Negrete-Pincetic, and S. Vicuña, "Robust streamflow forecasting: a Student's t-mixture vector autoregressive model," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 36, no. 11, pp. 3979–3995, 2022.

[2] M. Favereau, Á. Lorca, and M. Negrete-Pincetic, "Multistage adaptive robust optimization for the hydrothermal scheduling problem," *Computers & Operations Research*, vol. 150, p. 106051, 2023.

[3] A. Navarro, M. Favereau, Á. Lorca, D. Olivares, and M. Negrete-Pincetic, "Medium-term stochastic hydrothermal scheduling with short-term operational effects for large-scale power and water networks," *Applied Energy*, vol. 358, p. 122554, 2024.

[4] A. Durán, M. Favereau, Á. Lorca, S. Vicuña, Ó. Melo, and M. Negrete-Pincetic, "Evaluation of multipurpose reservoir operating policies at basin and electric power system scales," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 150, no. 7, 2024.

[5] A. Durán, M. Favereau, Á. Lorca, S. Vicuña, Ó. Melo, and M. Negrete-Pincetic, "Evaluation of multipurpose reservoir operating policies at basin and electric power system scale," in *Droughts in Chile*, D. Rivera and G. Donoso, Eds. Cham: Springer, Global Issues in Water Policy, vol. 31, 2025.

[6] M. Favereau, F. Babonneau, and Á. Lorca, "Water resources management: a bibliometric analysis and future research directions," *Annals of Operations Research*, 2024.

[7] Á. Lorca, M. Favereau, and D. Olivares, "Challenges in the management of hydroelectric generation in power system operations," *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 2020.

[8] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning," *Mathematical Programming*, vol. 52, no. 1, pp. 359–375, 1991.

Accelerated Non-Euclidean Methods for Fixed-Points of Nonexpansive Maps and Optimal Transport Problems

1st Juan Pablo Contreras
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile
juan.contreras@udp.cl

***Abstract*—This thesis develops a framework for optimization and fixed-point problems in non-Euclidean spaces, with applications to saddle-point formulations, Optimal Transport (OT), and Wasserstein Barycenter (WB) computation. The first part establishes convergence rates for Mann-type iterations on nonexpansive maps and identifies optimal algorithms within this class. The second part extends the Hybrid Primal-Dual method to non-Euclidean geometries, achieving convergence guarantees that translate into state-of-the-art performance on discrete OT and WB problems. The proposed approaches enhance numerical stability and accuracy compared to classical methods, providing robust and efficient tools for large-scale optimization in Operations Research and Machine Learning.**

***Index Terms*—fixed-point iterations, saddle-point formulations, non-Euclidean spaces, optimal transport.**

I. Introduction

Optimization and fixed-point problems play a central role in Operations Research (OR), underpinning a wide variety of methods for decision-making, equilibrium computation, and learning. Many classical optimization problems can be reformulated as finding a fixed point of an operator derived from optimality conditions or iterative schemes such as gradient descent or proximal methods. Conversely, numerous fixed-point problems, including those arising in game theory, network equilibria, and learning, can be interpreted as optimization problems under suitable monotonicity or convexity assumptions. This strong duality between optimization and fixed-point formulations has enabled the design of powerful iterative algorithms with convergence guarantees that are fundamental to modern computational OR.

While much of the existing theory assumes a Euclidean setting, many practical applications are inherently non-Euclidean. Problems in Optimal Transport (OT), Wasserstein Barycenter (WB) computation, entropy-regularized models, reinforcement learning, and sparse optimization naturally operate in spaces where the geometry is defined by norms or divergences other than the Euclidean one. In such settings, standard tools based on inner products and quadratic regularization become inadequate or suboptimal [2]. Non-Euclidean approaches, which exploit the structure of general normed spaces or Bregman divergences, provide a richer and more flexible framework to model these problems. This thesis is motivated by the need to extend the theoretical understanding and algorithmic efficiency of optimization and fixed-point methods to these broader, non-Euclidean contexts.

This thesis was developed at Universidad Adolfo Ibáñez under the supervision of Roberto Cominetti, with financial support from the ANID-PFCHA/Doctorado Nacional/2019-21190161 scholarship.

II. Fixed-Point Iterations in Non-Euclidean Spaces

We study the problem of finding fixed points of nonexpansive operators $T : \mathcal{X} \to \mathcal{X}$ defined on a normed space $(\mathcal{X}, \|\cdot\|)$; that is, points $x^\star$ satisfying $Tx^\star = x^\star$. The convergence behavior of iterative fixed-point algorithms depends strongly on the underlying geometry of the space. In this work, we consider possibly non-Euclidean spaces, meaning that the norm is not necessarily induced by an inner product.

To approximate a fixed point, we consider the general Mann iteration [7] defined by

$$x_n = \sum_{k=0}^{n} \pi_k^n \, T x_{k-1}, \qquad n \geq 0,$$

where $Tx_{-1} = x_0$, and the step-size coefficients satisfy $\pi_k^n \geq 0$, and $\sum_{k=0}^{n} \pi_k^n = 1$. This formulation encompasses several classical schemes, including the Krasnosel'skiĭ-Mann [6], Halpern [5], and Ishikawa iterations, as particular cases. Our objective is to analyze the worst-case performance of these algorithms and to identify optimal step-size or averaging policies that minimize the residual $\|x_n - Tx_n\|$.

We construct a tight non-asymptotic upper bound on the residual norm by formulating a sequence of nested optimal transport problems that capture the worst-case evolution of the iterates. Starting with the initialization $d_{-1,-1} = 0$ and $d_{-1,n} = d_{n,-1} = 1$, we define a double-indexed family of scalars $(d_{m,n})_{m,n}$ recursively as

$$d_{m,n} = \min_{z \in \mathcal{F}(\pi^m, \pi^n)} \sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} z_{i,j} \, d_{i-1,j-1},$$

where $\mathcal{F}(\pi^m, \pi^n)$ denotes the set of transport plans that map π^m onto π^n. The quantities $d_{m,n}$ represent the smallest admissible distances between iterates that are consistent with the nonexpansiveness property of the operator. Consequently, $\|x_m - x_n\| \leq d_{m,n}$ for all $m, n \geq 0$.

This recursive formulation provides a systematic way to track how the influence of previous iterates propagates through the iteration coefficients while preserving the geometric constraints imposed by nonexpansiveness. The optimal values of these transport problems define a bound R_n on the residual,

$$\|x_n - Tx_n\| \leq \sum_{i=0}^{n} \pi_i^n d_{i-1,n} \triangleq R_n,$$

which holds for any admissible choice of step-size or averaging parameters.

A key contribution of this thesis is the proof of the *tightness* of this bound. We show that for every number of iterations n, there exist nonexpansive operators and initialization conditions for which the residual exactly attains the value R_n. Consequently, this recursive bound cannot be improved without imposing additional assumptions on the underlying space or the operator. This establishes R_n as a universal benchmark that captures the best achievable worst-case behavior of all Mann-type iterations in arbitrary normed spaces, providing a definitive characterization of their complexity.

A particularly relevant instance is the Halpern iteration, defined as

$$x_n = (1 - \beta_n)x_0 + \beta_n Tx_{n-1},$$

which can be interpreted as a regularized Mann scheme where each iterate remains anchored to the initial point x_0. For this method, we show the following

Theorem (Optimal Halpern iteration) The stepsize sequence $(\beta_n)_n$ for the Halpern iteration is optimal and satisfies the recursion $\beta_n = (\beta_{n-1}^2 + 1)/2$. With this choice, the residual bound satisfies

$$\|x_n - Tx_n\| \leq \frac{4}{n+4} = \mathcal{O}(1/n)\,,$$

In contrast, the classical Krasnosel'skiĭ-Mann iteration is known to exhibit a slower rate of $\mathcal{O}(1/\sqrt{n})$ [1, 4], confirming the superior asymptotic performance of the Halpern scheme.

Finally, we establish a matching lower bound of $\Omega(1/n)$ for the residual of any general Mann iteration. This result shows that the rate achieved by the optimal Halpern iteration is indeed tight, up to constant factors, and cannot be improved without introducing additional structure on the operator or the space. Together, these results provide a complete characterization of the attainable convergence rates for fixed-point iterations in normed spaces, establishing the Halpern scheme as the optimal algorithm within this general framework.

The results obtained in this section can be directly applied to Reinforcement Learning, where the optimal policy is characterized as the fixed point of a Bellman operator that is nonexpansive in the $\|\cdot\|_\infty$ norm. Moreover, the thesis establishes a connection between fixed-point problems and smooth convex optimization, namely, for an L-smooth convex function f, accelerated gradient descent satisfies $\|\nabla f(x_n)\|_* = \mathcal{O}(1/n)$. This relation illustrates how fixed-point iterations and gradient-based methods share a common foundation, motivating the study of saddle-point formulations developed in the next section.

III. Saddle-Point Problems in Non-Euclidean Spaces

The second part of this work focuses on saddle-point problems arising, for instance, in Optimal Transport (OT) and Wasserstein Barycenter (WB) computation, both of which naturally operate in non-Euclidean geometries. These problems can be formulated as convex–concave saddle-point systems of the form

$$\min_{x \in \mathcal{X}} \max_{y \in \mathcal{Y}} \langle Kx, y \rangle + f(x) - g^*(y),$$

where $f : \mathcal{X} \to \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ and $g : \mathcal{Y} \to \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ are convex functions, g^* denotes the Fenchel conjugate of g, and $K : \mathcal{X} \to \mathcal{Y}$ is a linear operator. This formulation covers several important cases, including entropy-regularized OT and WB problems, as well as unbalanced variants with nonlinear mass penalization. These settings naturally call for algorithms that account for the underlying geometry of the problem rather than relying on Euclidean assumptions.

We develop a non-Euclidean generalization of the Hybrid Primal-Dual (HPD) algorithm [3] to solve these problems efficiently. The classical HPD method, originally introduced for Euclidean settings, alternates between primal and dual updates using proximal mappings. To adapt it to more general geometries, we employ Bregman divergences as distance-generating functions, replacing Euclidean quadratic regularization. This allows the algorithm to exploit the geometry induced by the underlying problem structure, leading to improved numerical stability and faster convergence in high-dimensional or ill-conditioned settings.

The generalized HPD iteration takes the form

$$y_{n+1} = \arg\max_{y \in \mathcal{Y}} \langle K\bar{x}_n, y \rangle - g^*(y) - D_{h^*}(y, y_n),$$

$$x_{n+1} = \arg\min_{x \in \mathcal{X}} f(x) + \langle Kx, y_{n+1} \rangle + D_h(x, x_n),$$

where D_h and D_{h^*} denote Bregman divergences associated with strongly convex distance-generating functions h and h^*. The extrapolated variable $\bar{x}_n$ ensures stability and acceleration analogous to Nesterov's momentum. This framework includes several well-known primal-dual and mirror-descent schemes as special cases. The main result is the following:

Theorem (Convergence of the Non-Euclidean HPD) Assume that f and g are convex and that the dual function g^* is relatively strongly convex with respect to the kernel h^*. Then, for appropriate step sizes (τ, σ), the iterates (x_n, y_n) generated by the non-Euclidean HPD method satisfy

$$\mathcal{L}(x_n, y) - \mathcal{L}(x, y_n) \leq \frac{C}{n},$$

for some constant $C > 0$ depending on the initial Bregman distances. Consequently, the algorithm achieves an $\mathcal{O}(1/n)$ convergence rate in the ergodic sense, matching the best known results in the Euclidean setting while offering greater geometric flexibility.

We then specialize the proposed algorithmic framework to address both regularized and unregularized Optimal Transport (OT) and Wasserstein Barycenter (WB) problems. The classical discrete OT problem seeks a transport plan $X \in \mathbb{R}_+^{n\times n}$ minimizing the total cost of moving a probability mass distribution $a \in \Delta_n$ onto $b \in \Delta_n$ with respect to a cost matrix $C \in \mathbb{R}^{n\times n}$:

$$\min_{X\in\mathbb{R}_+^{n\times n}} \langle C, X\rangle \quad \text{s.t.} \quad X\mathbf{1} = a, \quad X^\top \mathbf{1} = b.$$

While this formulation is fundamental, the linear constraints can make it computationally challenging in high dimensions. To mitigate this, the entropy-regularized OT problem introduces a regularization parameter $\varepsilon > 0$, yielding the smoothed objective

$$\min_{X\in\mathbb{R}_+^{n\times n}} \langle C, X\rangle + \varepsilon \sum_{i,j} X_{ij}(\log X_{ij} - 1),$$

which improves numerical stability and promotes dense, differentiable transport plans.

In this context, the non-Euclidean geometry of the problem is naturally captured through the Bregman divergence associated to the potential $h(x) = \sum_i x_i(\log x_i - 1)$, which yields the well-known Kullback–Leibler divergence.

As a direct consequence of the convergence analysis of the non-Euclidean HPD algorithm, we obtain the following result for discrete OT and WB problems. This corollary establishes that our methods achieve the same asymptotic complexity as the best existing algorithms while benefiting from improved numerical stability.

Corollary (Complexity of HPD in OT and WB) For discrete OT and WB problems with cost matrix C and target precision $\varepsilon > 0$, the proposed non-Euclidean HPD and splitting algorithms achieve a computational complexity of

$$\widetilde{\mathcal{O}}\left(n^{5/2}\frac{\|C\|_\infty}{\varepsilon}\right),$$

where $\widetilde{\mathcal{O}}$ hides logarithmic factors on $1/\varepsilon$.

Figure 1 illustrates the qualitative performance of various algorithms on a discrete barycenter computation task. Classical methods such as Mirror Descent (MD), Iterative Bregman Projections (IBP), and Accelerated Gradient Descent (AGD) produce blurred or distorted transport maps, reflecting their sensitivity to regularization and numerical instability. In contrast, the methods developed in this thesis—namely the Hybrid Primal-Dual (HPD), Douglas–Rachford (DR), and DROT—achieve reconstructions that are sharper and closer to the true optimum.

In conclusion, the approaches developed in this thesis leverage non-Euclidean geometry and Bregman regularization

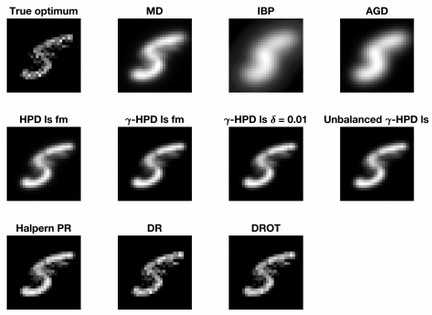


Fig. 1. Comparison of barycenter obtained with several methods

to improve convergence and numerical stability, yielding accurate and consistent solutions even in challenging problem instances. The proposed framework unifies fixed-point theory and saddle-point optimization under a common geometric perspective, enabling the development of algorithms that are both theoretically optimal and computationally efficient. These ideas can be further extended to bilevel and stochastic optimization, where similar geometric principles may lead to new methods for hierarchical decision-making, learning, and equilibrium.

REFERENCES

[1] J Baillon and RE Bruck. The rate of asymptotic regularity is $o(1/\sqrt{n})$. *Theory and applications of nonlinear operators of accretive and monotone types*, pages 51–81, 1996.

[2] Amir Beck and Marc Teboulle. Mirror descent and nonlinear projected subgradient methods for convex optimization. *Operations Research Letters*, 31(3):167–175, 2003.

[3] Antonin Chambolle and Thomas Pock. A first-order primal-dual algorithm for convex problems with applications to imaging. *Journal of mathematical imaging and vision*, 40(1):120–145, 2011.

[4] Roberto Cominetti, José A Soto, and José Vaisman. On the rate of convergence of krasnosel'skiĭ-mann iterations and their connection with sums of bernoullis. *Israel Journal of Mathematics*, 199(2):757–772, 2014.

[5] Benjamin Halpern. Fixed points of nonexpanding maps. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 73(6): 957–961, 1967.

[6] Mark Aleksandrovich Krasnosel'skiı. Two remarks on the method of successive approximations. *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, 10(1):63, 1955.

[7] W Robert Mann. Mean value methods in iteration. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 4(3): 506–510, 1953.

Blockchain for Sustainable Agri-Food: A Bi-Objective Optimization and Barrier Analysis

Arman Derakhti
Faculty of Engineering and Sciences
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
derakhti.arman@gmail.com

Ernesto DR Santibanez Gonzalez
Industrial Engineering Department,
CES4.0, Faculty of Engineering,
Universidad de Talca
Curico, Chile
santibanez.ernesto@gmail.com

***Abstract*— This paper addresses the challenge of digital transformation in the agri-food supply chain by integrating qualitative analysis with quantitative optimization. A systematic literature review established the critical technical and financial barriers to Industry 4.0 adoption and identified a major gap in quantitative sustainability modeling. To bridge this, a novel bi-objective mixed-integer linear programming (MILP) model is introduced, which functionally integrates Blockchain Technology adoption. The model simultaneously minimizes cost and carbon emissions by using a traceability coefficient (α) to quantify BCT's environmental benefits. This research moves beyond conceptual barriers to provide a prescriptive decision-support framework for strategically optimizing digital, sustainable agri-food supply chain design.**

Keywords— Agri-food Supply Chain, Blockchain Technology, Perishable Products, Mixed-Integer Linear Programming, Multi-objective Optimization

I. INTRODUCTION

The global agri-food supply chain (AFSC) is under immense, defining pressure. With the world population growing and resources dwindling, our food systems must radically improve their efficiency, resilience, and sustainability. This complexity often leads to waste, fraud, and a significant carbon footprint, necessitating a fundamental shift toward digitalization and transparency [1].

This doctoral research tackles this transformation head-on by exploring how Industry 4.0 (I4.0) technologies, specifically Blockchain Technology (BCT), can be strategically deployed to optimize AFSCs. Our goal is to balance the economic bottom line with environmental and social obligations, addressing all three pillars of sustainability.

The Digitalization Challenge:

To harness this digital wave, we first need clarity. I4.0 is the accepted framework for innovation, yet its practical application in the AFSC is blurry. Our first major contribution, a systematic literature review (SLR) [2], focused on cutting through this confusion. We aimed to clearly define the I4.0 ecosystem relevant to food systems and, more importantly, expose the real-world technical, financial, and social barriers preventing adoption. This review revealed a crucial missing piece: a strong foundation for quantitatively linking I4.0 adoption to concrete, measurable sustainability goals.

Modeling the Solution: Traceability and Optimization

Building on this identified gap, the research pivots to developing a prescriptive solution centered on digital traceability. BCT is the most compelling I4.0 tool for this job, offering a decentralized, tamper-proof record that builds essential trust across the supply chain [3]. Yet, its promise is constantly undermined by high implementation costs and unclear trade-offs against environmental benefits.

Our core contribution is addressing this quantifiable gap head-on. We introduce a novel bi-objective mathematical model that fully integrates the decision of BCT adoption into the core planning of a perishable AFSC. The model treats BCT-enabled traceability not just as a feature, but as a strategic lever to drive down carbon emissions through superior coordination, simultaneously evaluating the financial cost.

In essence, this thesis moves seamlessly from defining the barriers to digitalization (I4.0) to delivering a robust optimization tool (BCT).

II. LITERATURE REVIEW

The foundation of this research is built upon two critical investigative streams: establishing the conditions and challenges inherent in digital transformation, and subsequently defining the precise quantitative gap addressed by our modeling work.

1. Defining the Digital Challenge and I4.0 Barriers

Our initial comprehensive systematic literature review [2] provided the necessary context by focusing on the industry 4.0 paradigm. We confirmed that I4.0 technologies—such as the Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS), and the Smart Factory concept—represent the essential components for a modernized agri-food supply chain (AFSC). However, the review systematically classified and analyzed the significant, practical barriers obstructing this adoption. These barriers were grouped across five themes: technical (e.g., security, architectural standards), operational, financial (highlighting the high initial investment costs), social (e.g., resistance to change), and infrastructure (e.g., lack of reliable connectivity).

Crucially, this foundational work revealed a structural deficiency in the existing scholarly discourse: a failure to translate the qualitative benefits of I4.0 into quantifiable sustainability outcomes. The literature lacked rigorous, optimization-based approaches that explicitly coupled I4.0 adoption decisions with measurable environmental or economic goals. This identified gap underscored the urgent need for prescriptive decision-making tools.

2. The Strategic Role and Specific Applications of Blockchain Technology

This structural gap motivated a targeted investigation into BCT, an essential I4.0 enabler that promises to resolve the AFSC's core issues of information asymmetry, limited visibility, and lack of trust. BCT's defining characteristics—immutability, disintermediation, and smart contract automation—have made it attractive for addressing inefficiencies [4].

Within the AFSC specifically, BCT has been widely explored for its potential to enhance food safety and compliance. Systems have been proposed to integrate real-time data reporting for grain supply chains [5] and to enforce compliance protocols [6], demonstrating BCT's versatility in upholding regulatory and quality standards. However, despite these efforts and the success of pilot programs by major retailers (like Walmart's initiative), the widespread, large-scale adoption of BCT remains limited. This reluctance is underpinned by persistent technical, economic, and organizational barriers, notably high initial investment, unclear returns on investment, and inadequate supporting infrastructure [7]. The challenge is not technological; it is strategic: how to rigorously justify BCT's costs against the environmental and economic value it creates through improved coordination and traceable supply chains.

3. *The Quantitative Modeling Gap and Research Differentiation*

The final, decisive stage of this literature review focused on the mathematical incorporation of BCT into supply chain models, which represents the precise area for our intervention. While a number of studies have integrated BCT into integer programming models for supply chain design [8] and multi-objective optimization [9], [10], we identified three primary limitations distinguishing our work:

Simplistic Representation of BCT: A majority of existing models treat blockchain implementation as a highly simplified element, often represented by a straightforward binary decision variable paired with a fixed cost [9], [10]. This approach is insufficient, as it fails to capture the intricate, functional characteristics of blockchain, such as transaction costs and emissions tied to platforms like Ethereum, and how BCT-enabled traceability structurally alters supply chain decisions.

Lack of Functional Integration: Even in more advanced multi-objective models, BCT is frequently used merely to support coordination [11] or as a factor in a supplier selection score, without creating a functional link between the adoption decision and the optimization outcome. Modeling efforts that have attempted more granularity, such as incorporating block generation variables [12], still often neglect the direct, quantifiable impact on emissions.

Neglect of Environmental Quantification: Crucially, while cost minimization is common, few studies explicitly and simultaneously model both total cost and carbon emissions as directly affected by the BCT adoption decision. This absence is particularly pronounced within the agri-food sector.

This systematic review confirms the finding from our initial work [2]: there is a pressing need for a bi-objective mathematical model that links BCT adoption decisions with both cost minimization and carbon emission reduction in a perishable AFSC. The doctoral dissertation addresses this critical void by introducing a model that explicitly integrates BCT transaction costs and uses traceability as a defined mechanism for environmental performance improvement.

III. Methodology

The methodology underpinning this research is dual-phased, integrating qualitative, evidence-based review techniques with prescriptive, quantitative optimization modeling. This structure moves logically from identifying the research gap to providing a decision-support tool to address it.

Phase I: Systematic Literature Review Design

The first phase employed a Systematic Literature Review (SLR) based on established protocols. The process comprised five rigorous steps: research question definition, search strategy design, study selection, quality assessment, and data extraction.

Research Questions (RQs): Six specific research questions were devised to systematically explore the digital agri-food landscape. These questions ranged from classifying which agri-food products utilized I4.0 technologies (RQ1-RQ2) to, critically, assessing the existing literature's engagement with sustainability (RQ3-RQ4) and identifying the core challenges and barriers to I4.0 adoption (RQ5-RQ6).

Search Strategy and Selection: A comprehensive search strategy was designed using two major databases, Web of Science (WOS) and SCOPUS. Keywords were strictly derived from the RQs and connected using Boolean operators (AND, OR, and ASTERISK) to ensure precision across four I4.0 components (IoT, CPS, IoS, and Smart Factory/Farming) and four AFSC types. The selection process utilized inclusion/exclusion criteria to narrow the initial search results down to a final set of high-relevance peer-reviewed publications.

Quality Assessment: A structured quality assessment, using a weighted checklist, was applied to ensure the robustness and relevance of the final corpus, confirming that the gathered data was suitable for answering the defined research questions.

The outcome of this SLR was the identification and classification of core barriers and, most importantly, the confirmation of a major research deficiency in the quantitative modeling of I4.0's sustainable impact.

Phase II: Bi-Objective Modeling and Architecture

Building on the gap identified in Phase I, the second phase involved the development of a Bi-Objective Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model to evaluate the strategic integration of BCT into a two-echelon perishable AFSC. The model is centered on the packer as the key decision-maker.

A. Novel Blockchain Architecture

To accurately model the costs and benefits of BCT, a layered blockchain architecture was proposed, structured around a typical fresh agri-food supply chain (e.g., avocados) and built on the Ethereum blockchain infrastructure post-Merge:

Physical Layer: Defines the supply chain stages (Packers contracting Farmers, then distributing to Distribution Centers).

Transaction Layer: Distinguishes between Transaction Type 1 (Smart Contract execution for formal agreements) and

Transaction Type 2 (data logging and tracking for operational transparency).

Consensus and Ethereum Layers: These layers govern the network, ensuring data integrity using the Proof-of-Stake (PoS) protocol, providing a functional basis for modeling BCT's operational costs and emissions.

B. Optimization Model Formulation

The core of the methodology is the bi-objective optimization model, which simultaneously addresses two competing objectives:

Minimize Total Cost: This objective function incorporates all traditional supply chain costs (transportation, inventory, operational costs) plus the explicit financial costs associated with BCT adoption (smart contract execution and transaction fees, based on post-Merge Ethereum parameters).

Minimize Carbon Emissions: This objective function incorporates standard supply chain emissions (transportation, facility operation) and introduces a novel mechanism: a traceability coefficient (α). This coefficient models the marginal emission reduction enabled by BCT adoption, reflecting improved coordination, reduced waste, and enhanced efficiency across the supply chain.

The model uses the epsilon (ϵ)-constraint method to systematically explore the trade-off space between these two conflicting objectives, generating the Pareto frontier of non-dominated solutions. This mathematical framework allows for strategic evaluation of the critical threshold at which BCT adoption becomes economically and environmentally optimal for the AFSC.

IV. Conclusion

This three-page abstract summarizes a doctoral dissertation that systematically investigates the digitalization of the agri-food supply chain (AFSC), moving from foundational analysis to prescriptive optimization. Our goal was to provide a robust framework for balancing economic performance with enhanced sustainability metrics, utilizing I4.0 technologies.

The research established its foundation through a SLR, which rigorously defined the I4.0 components relevant to the AFSC and identified 15 key barriers to adoption, classified into five themes (technical, operational, financial, social, and infrastructural). Crucially, this SLR identified a major research gap: the qualitative literature failed to provide quantitative, optimization-based tools that explicitly linked I4.0 adoption decisions with measurable sustainability targets.

Addressing this gap, the thesis then introduced a novel Bi-Objective MILP model. This model focused on BCT—a core I4.0 enabler for traceability—and integrated it into a two-echelon perishable AFSC structure.

Key Contributions and Empirical Recommendations

Our combined approach yields two primary contributions i) bridging the Qualitative-Quantitative Divide: Unlike previous work that treated BCT adoption as a simplistic binary variable, this study provided a nuanced, explicit mathematical framework. It introduced a-layered BCT architecture and formally modeled BCT transaction costs and emissions using real-world Ethereum post-Merge parameters. This robust integration demonstrates how BCT functionally impacts supply chain decisions.

ii) Quantifying the Traceability Lever: The model's major innovation is the traceability coefficient (α), which links BCT adoption directly to carbon emission reduction through improved coordination and reduced waste. The results (though excluded from this abstract) confirm that traceability is not merely a governance feature but a powerful lever for supply chain redesign.

In summary, this dissertation moves the field beyond theoretical discussions of I4.0 barriers to offering a generalizable, data-driven framework for quantifying the conditions under which BCT adoption delivers dual gains in cost-effectiveness and environmental performance. This work provides actionable decision-support for agri-food exporters, policymakers, and sustainability managers seeking to strategically navigate the sustainable digital transformation of their supply chains.

References

[1] A. Tandon, A. Dhir, P. Kaur, S. Kushwah, and J. Salo, "Why do people buy organic food? The moderating role of environmental concerns and trust," *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 57, 2020, doi: 10.1016/j.jretconser.2020.102247.

[2] A. Derakhti, E. D. R. Santibanez Gonzalez, and A. Mardani, "Industry 4.0 and Beyond: A Review of the Literature on the Challenges and Barriers Facing the Agri-Food Supply Chain," 2023. doi: 10.3390/su15065078.

[3] S. Thangamayan, K. Pradhan, G. B. Loganathan, S. Sitender, S. Sivamani, and M. Tesema, "Blockchain-Based Secure Traceable Scheme for Food Supply Chain," 2023. doi: 10.1155/2023/4728840.

[4] V. Babich and G. Hilary, "Distributed ledgers and operations: What operations management researchers should know about blockchain technology," *Manufacturing and Service Operations Management*, vol. 22, no. 2, 2020, doi: 10.1287/MSOM.2018.0752.

[5] X. Zhang *et al.*, "Blockchain-based safety management system for the grain supply chain," *IEEE Access*, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975415.

[6] A. Iftekhar and X. Cui, "Blockchain-based traceability system that ensures food safety measures to protect consumer safety and COVID-19 free supply chains," *Foods*, vol. 10, no. 6, 2021, doi: 10.3390/foods10061289.

[7] A. Aldrighetti, M. Canavari, and M. K. Hingley, "A Delphi Study on Blockchain Application to Food Traceability," *International Journal on Food System Dynamics*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.18461/ijfsd.v12i1.72.

[8] S. Yadav and S. Prakash Singh, "Modelling procurement problems in the environment of blockchain technology," *Comput Ind Eng*, vol. 172, 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108546.

[9] M. Oudani, "A combined multi-objective multi criteria approach for blockchain-based synchromodal transportation," *Comput Ind Eng*, vol. 176, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.108996.

[10] A. Vaezi, E. Rabbani, and S. A. Yazdian, "Blockchain-integrated sustainable supplier selection and order allocation: A hybrid BWM-MULTIMOORA and bi-objective programming approach," *J Clean Prod*, vol. 444, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141216.

[11] V. K. Manupati, T. Schoenherr, M. Ramkumar, S. M. Wagner, S. K. Pabba, and R. Inder Raj Singh, "A blockchain-based approach for a multi-echelon sustainable supply chain," *Int J Prod Res*, vol. 58, no. 7, 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1683248.

[12] A. Modares, N. M. Farimani, and F. Dehghanian, "A New Vendor-Managed Inventory Model by Applying Blockchain Technology and Considering Environmental Problems," *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 7, no. 5, 2023, doi: 10.1007/s41660-023-00338-7.

Session N°5 – Track N°2

OR Applications in Energy

Chair: Muñoz-Pincheira, J. *(Universidad Andrés Bello)*
Place: G6-054
Time: 08:30 – 09:45

An Aggregated Partition Based Method for Decision-Focused Learning: Application to Microgrid Energy Management

Time: 08:30 – 08:45
Authors:

- Lizama, C. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Homem-de-Mello, T. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Lagos, G. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Jara, F. *(Universidad Diego Portales)*

Oil in Turmoil: The Impact of Microstructure Noise on Mean-Variance Optimization

Time: 08:50 – 09:05
Author: Tomanová, P. *(Prague University of Economics and Business)*

Evaluación del Impacto de la Complementariedad Temporal Energética Eólico-Solar en el Diseño de Sistemas Híbridos de Energía Renovable Autónomos con Almacenamiento Utilizando Inteligencia Artificial

Time: 09:10 – 09:25
Author: Muñoz-Pincheira, J. *(Universidad Andrés Bello)*

An Aggregated Partition Based Method for Decision-Focused Learning: Application to Microgrid Energy Management

Cristofer Lizama
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Viña del Mar, Chile
crlizama@alumnos.uai.cl

Tito Homem-de-Mello
Escuela de Negocios
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
tito.hmello@uai.cl

Guido Lagos
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Viña del Mar, Chile
guido.lagos@uai.cl

Francisco Jara
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile
francisco.jara@udp.cl

***Abstract*—Esta investigación aborda el enfoque de aprendizaje y optimización integrados, en el cual un estimador se entrena para obtener el mejor desempeño operativo dentro de un problema de planificación específico. El modelo resultante se formula como un problema de optimización bilevel con múltiples subproblemas de segundo nivel, uno por cada observación histórica. Dado el alto costo computacional que esto implica, se propone una adaptación del método Aggregated Partition Based Method (APM) para reducir la cantidad de subproblemas sin comprometer la calidad de la solución. La metodología se valida en un caso de gestión energética de microrredes residenciales con generación fotovoltaica, donde la incertidumbre se modela a partir de datos climáticos reales con resolución horaria.**

***Index Terms*—Optimización Bilevel, Microrredes, Aprendizaje impulsado por la aplicación**

I. Introducción y Motivación

En escenarios de decisión bajo incertidumbre con alta disponibilidad de datos históricos y contextuales, la optimización contextual ha emergido como un enfoque poderoso para mejorar la calidad de las decisiones. A diferencia de los métodos clásicos, que dependen de distribuciones teóricas, la optimización contextual aprovecha covariables observables para generar predicciones ajustadas al entorno particular de cada instancia [1].

En esta línea, la metodología Application Driven Learning (AD) [2] se enmarca dentro del paradigma de Integrated Learning and Optimization (ILO), que busca integrar explícitamente el proceso de aprendizaje con el proceso de optimización en contextos reales. En lugar de tratar la predicción y la optimización como etapas separadas, ILO propone calibrar los modelos predictivos en función de su impacto en la calidad de las decisiones resultantes.

AD adopta esta filosofía mediante una estructura bilevel, donde los parámetros del modelo de pronóstico no se ajustan minimizando el error estadístico, sino optimizando directamente el desempeño operativo de las decisiones inducidas. A diferencia de otros enfoques ILO, AD no requiere supuestos de suavidad ni convexidad, lo que permite integrar funciones de costo no suaves y abordar problemas no convexos de gran escala. Esto se logra resolviendo un problema jerárquico, en el que el nivel superior define los parámetros del modelo y minimiza los costos reales de implementación, y el nivel inferior resuelve múltiples subproblemas, uno por cada observación del conjunto de entrenamiento, para obtener decisiones óptimas condicionadas al pronóstico generado.

II. Desafios

A. Complejidad Computacional

La resolución exacta de modelos bilevel con múltiples subproblemas de segundo nivel enfrenta serios desafíos computacionales, especialmente en aplicaciones impulsadas por datos con incertidumbre. Una reformulación clásica consiste en aplicar las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) para representar cada subproblema del seguidor como un conjunto de restricciones que incluyen factibilidad primal, dual y condiciones de complementariedad. Esta transformación permite llevar el problema a una formulación equivalente de un solo nivel, típicamente un problema de programación entera mixta (MILP) [3], [4].

Sin embargo, la combinación de no convexidad, alta dimensionalidad y múltiples condiciones de complementariedad convierte al problema resultante en un problema de alta complejidad, incluso al contar con recursos computacionales avanzados. En particular, en el contexto de AD, el desempeño del estimador mejora al aumentar el número de observaciones de entrenamiento, lo que implica resolver más subproblemas de segundo nivel. Aunque estos crecen linealmente con los datos, la carga computacional escala de manera más alta,

volviendo impracticable su resolución exacta en tiempo razonable incluso mediante el uso de clúster, considerando que el problema es NP-HARD.

B. Formulación Bilevel

En el modelo de optimización de dos niveles, existe jerarquía entre el primer nivel (1)-(2) y el segundo nivel (3). Esta relación se establece mediante la restricción (2), la cual vincula el primer nivel con el segundo al definir el pronóstico en función de características explicativas x_n. De esta manera, la restricción influye directamente en el espacio factible de las decisiones del segundo nivel, caracterizando la interacción entre ambos niveles en el modelo de optimización.

Como puede notar la ecuación (3), contempla N subproblemas de segundo nivel independientes entre si, además la función objetivo de cada subproblema se encuentra bajo la incertidumbre asociada a un problema de dos etapas, donde se obtendrá una política óptima $z_n^*(\hat{y}_n)$, que será considerada en (1).

$$\theta_N^{AD} \in \arg\min_{\theta\in\Theta,\hat{y}_n,z_n^*} \frac{1}{N}\sum_{n\in N} G(z^*(\hat{y}_n), y_n) \tag{1}$$

$$\text{s.a.} \quad \hat{y}_n = \Psi(\theta, x_n) \quad \forall n \in N \tag{2}$$

$$z_n* \in \arg\min_{z\in Z} G(z, \hat{y}_n) \quad \forall n \in N \tag{3}$$

Donde

$$G(z, \hat{y}) = c^T z_n + Q(z_n, \hat{y}_n) \tag{4}$$

$$Q(z, y) = \min_u \{q^T u \mid Wu \geq b - Hz + F\hat{y}\} \tag{5}$$

El primer nivel tiene como objetivo minimizar el costo real de implementación considerando la pólitica óptima de los N problemas de segundo nivel, con el fin de definir el estimador θ_N^{AD} que minimice el desempeño en costos utilizando la observación real de y_n, tal como se muestra en (1).

En esta metodología se identifican dificultades que aumentan la complejidad de resolución de problemas de gran escala, como la no convexidad para la función objetivo de (1), por la incertidumbre proveniente de los subproblemas de segundo nivel (3), la naturaleza jerárquica entre ambos niveles y finalmente el tamaño de N correspondiente a los problemas de segundo nivel.

La formulación del modelo de optimización de dos niveles incluye N subproblemas lineales (LP) de dos etapas en el segundo nivel, los que corresponden a la gestión horaria de los flujos de energía en la microrred con generación de energía fotovoltaica y por la naturaleza de la generación de energía, presenta incertidumbre. Donde la primera etapa (4) corresponde a los periodos del día donde no hay incertidumbre y (5) a los que sí.

En base al análisis de los datos históricos, se establece que los periodos con incertidumbre varían según la estación del año. Durante el verano y la primavera, la incertidumbre se concentra entre las 07:00 a.m. y las 21:00 p.m., mientras que en otoño e invierno se restringe al intervalo comprendido entre las 08:00 a.m. y las 20:00 p.m. Esta diferenciación estacional será incorporada explícitamente en la formulación del subproblema, permitiendo capturar de manera más realista la dinámica operativa del sistema energético bajo análisis.

El problema de dos etapas está inspirado en la formulación utilizada en [5], desde donde se utilizaron los datos y especificaciones técnicas para replicar el sistema de microrred instalado en Cauquenes, Chile. En la Figura 1 puede ver una representación de los flujos de energía del sistema.

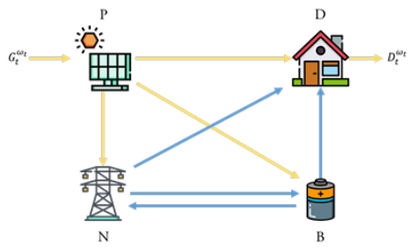


Fig. 1. Representación de los flujos del sistema de microrred [5].

III. Método APM para Bilevel con Multiples Problemas de Segundo Nivel

Como se comentó anteriormente, a medida que aumenta el tamaño de N los problemas no pueden ser resueltos en tiempos razonables y la capacidad computacional termina siendo extremadamente alta. Por lo que se propone una nueva metodología que permita resolver este tipo de problemas.

Se implementará la lógica de la metodología APM desarrollada en [6], propuesta como una estrategia eficiente para resolver problemas de optimización de dos etapas bajo incertidumbre, especialmente en contextos con un número elevado de escenarios.

En este trabajo se propone una reformulación de la metodología APM para abordar problemas de optimización de dos niveles con múltiples subproblemas en el segundo nivel. La principal fuente de complejidad computacional proviene precisamente de estos subproblemas, los cuales corresponden a los distintos días de entrenamiento. Por esta razón, en esta variante del método, las particiones se construyen sobre el conjunto de días de entrenamiento, agrupando aquellos que presentan comportamientos similares.

De este modo, se resuelven versiones simplificadas del problema original mediante la agregación de días, lo que permite reducir la carga computacional.

El algoritmo comienza con una partición inicial, la cual corresponde a la agrupación de todos los días de entrenamiento. En las ecuaciones (6) - (8) se presenta el problema de dos niveles, donde en el segundo nivel se encuentran los problemas asociados a la partición y en el primer nivel el costo de implementación para el problema de la partición. Donde $E[y|P]$ es el valor esperado de la generación de energía de la

partición, y $E[x|P]$ son las observaciones climáticas promedio de la partición.

Problema Maestro (MP)

$$\theta_P \in \arg \min_{\theta_P \in \Theta, \hat{y}_P, z_P^*} \sum_{P \in \mathcal{P}} \left[c^T z_P^* + Q(z_P^*, E[y|P]) \right] \cdot \mathrm{P}(P) \tag{6}$$

$$\text{s.a.} \quad \hat{y}_P = \Psi(\theta, E[x|P]), \quad \forall P \in \mathcal{P} \tag{7}$$

$$z_P^* \in \arg\min_{z \in Z} \left[c^T z + Q(z, \hat{y}_P) \right], \quad \forall P \in \mathcal{P} \tag{8}$$

Con esta resolución simplificada del problema se obtiene una solución para la partición θ_P^*, además de un lowerbound para la solución óptima proveniente del valor de la función objetivo de (6), la que será equivalente a V_{LB}. Con el estimador obtenido en el problema de la partición se resuelve el subproblema asociado a cada día de entrenamiento, dado el estimador θ_P^*, se presenta en las ecuaciones (9) - (10).

P-Stage Problem (PSP)

$$\min_{z \in Z} \left(c^\top z + Q(z, \hat{y}(\theta_P^*, x_n)) \right) \tag{9}$$

$$\text{s.a.} \quad Q(z_n, \hat{y}_n) = \min_{u \in U} \left\{ q^T u_n \mid W u_n \geq b - H z_n + F \hat{y}_n \right\} \tag{10}$$

Las decisiones de primera etapa de cada día de entrenamiento son almacenadas en una matriz $z_{n,t,k}$, donde n corresponde al día, t al periodo de tiempo y k al flujo de energía. Luego, mediante la distancia entre las matrices de decisiones de cada día dentro de una partición, se agrupan los días donde las decisiones de primera etapa sean similares, para desagregar los días que no cumplen ese criterio. Con estas decisiones fijas de cada día se evaluará el costo de implementación real que implicó el estimador θ_P^*, mediante (11), valor que es equivalente a un upperbound para la solución óptima.

$$V_{\text{UB}} = \frac{1}{N} \sum_{n \in N} \left[c^\top z_n^* + Q(z_n^*, y_{\text{real}}) \right] \tag{11}$$

Note que MP corresponde a la etapa de optimización y PSP a una etapa de refinamiento de particiones. Este proceso se realiza iterativamente hasta alcanzar un criterio de parada definido por (12). De esta forma, el algoritmo se detiene si es que la partición luego de refinar se repite o si es que se alcanza un gap δ entre V_{UB} y V_{LB}.

$$\mathcal{P}_{\text{anterior}} = \mathcal{P}^* \quad \textbf{o} \quad \frac{V_{\text{UB}} - V_{\text{LB}}}{V_{\text{LB}}} < \delta \tag{12}$$

IV. Resultados

Una vez resuelto el modelo de optimización, es posible extraer conclusiones relevantes respecto al impacto de la constante big M, cuya elección constituye un problema de naturaleza NP-Hard y afecta directamente los tiempos de resolución del modelo. Se resolvieron tanto las versiones completas como las versiones aproximadas mediante la metodología APM. La resolución exacta del modelo completo requirió recursos computacionales significativos, alcanzando entre 120 y 400 GB de memoria RAM.

La Tabla I presenta los resultados computacionales desglosados por estación, incluyendo el número de días u observaciones de entrenamiento, el tiempo de ejecución y el gap entre la solución obtenida mediante APM y la solución óptima de AD, con respecto al costo real de implementación del estimador entrenado.

Los resultados correspondientes a las cuatro estaciones del año evidencian que la metodología APM permite reducir de manera significativa los tiempos de procesamiento, logrando al mismo tiempo una aproximación a la solución óptima con un gap aceptable.

Estación	**Días**	**Tiempo AD**	δ	**Tiempo APM**	**GAP**
Verano	71	3165 sg	0.01	83 sg	0.002%
Primavera	58	6232 sg	0.01	32 sg	0.06%
Invierno	55	433025 sg	0.01	523 sg	0.05%
Otoño	41	29809 sg	0.01	1795 sg	0.016%

TABLE I
RESULTADOS POR ESTACIÓN

V. Conclusiones

Finalmente, se concluye que la adaptación de la metodología APM constituye una alternativa efectiva para reducir significativamente los tiempos de procesamiento en la resolución de la metodología AD. Los resultados indican que el sacrificio en términos de optimalidad es acotado, y que los valores V_{UB} Y V_{LB}, proveen cotas válidas que enmarcan consistentemente la solución óptima del problema original.

Operativamente, la metodología permite tomar decisiones anticipadas y de mayor calidad frente a la incertidumbre, mejorando el desempeño en costos frente a modelos tradicionales y fortaleciendo la gestión energética de la microrred.

Agradecimientos

Estudios de postgrado Financiados por ANID Subdirección de Capital Humano / Magíster Nacional / Año 2025 - Folio 22251621. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDECYT Regular N.º 1221770, dirigido por el profesor Tito Homem-de-Mello.

References

[1] Sadana, U., Chenreddy, A., Delage, E., Forel, A., Frejinger, E., and Vidal, T. (2024). A survey of contextual optimization methods for decision-making under uncertainty. European Journal of Operational Research.

[2] Dias, J., Street, A., Homem-de Mello, T., and Munoz, F. D. (2024). Application-driven learning: A closed-loop prediction and optimization approach applied to dynamic reserves and demand forecasting. OPERATIONS RESEARCH.

[3] Kleinert, T., Labbé, M., Ljubic, I., and Schmidt, M. (2021). A survey on mixed-integer programming techniques in bilevel optimization. EURO Journal on Computational Optimization, 9:100007.

[4] Beck, Y., Ljubic, I., and Schmidt, M. (2023). A survey on bilevel optimization under uncertainty. European Journal of Operational Research, 311(2):401–426.

[5] Jara, F., Carrasco, R. A., Homem-de Mello, T., and Ruz, G. A. (2024). Improving energy storage management in a microgrid via machine learning and stochastic optimization. Proyecto FONDEF (No publicado).

[6] Ramirez-Pico, C. and Moreno, E. (2022). Generalized adaptive partition-based method for two- stage stochastic linear programs with fixed recourse. Mathematical Programming, 196(1-2):755– 774. Publisher Copyright: © 2021, Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature and Mathematical Optimization Society.

Oil in Turmoil: The Impact of Microstructure Noise on Mean-Variance Optimization

Petra Tomanová
Department of Econometrics
Prague University of Economics and Business
Prague, Czechia
petra.tomanova@vse.cz

***Abstract*—We present an intraday pairs trading strategy applied to seven leading oil companies listed on the New York Stock Exchange during the volatile period following Russias invasion of Ukraine in February 2022, a time marked by sharp increases in oil prices and stock volatility. Utilizing ultra-high-frequency data, we model the spread dynamics with a continuous-time Ornstein–Uhlenbeck process. To mitigate distortions caused by microstructure noise inherent in high-frequency data, we employ noise-robust estimators that eliminate bias in parameter estimation. The methodology focuses on mean-variance optimization to derive optimal trading signals by determining the first-passage times of the process. Empirical results demonstrate that conventional estimation techniques substantially overestimate the Ornstein–Uhlenbeck parameters.**

***Index Terms*—Ornstein–Uhlenbeck Process, High-Frequency Data, Market Microstructure Noise, Pairs Trading**

I. Introduction

When stock prices are tracked at high frequencies, more detailed information becomes available for estimating the parameters of the price process. However, high-frequency data are contaminated by market microstructure noise, which can cause significant bias in parameter estimation if ignored. We revisit our methodology introduced in Holý and Tomanová (2018) [1], where we proposed a maximum likelihood estimator for the Ornstein–Uhlenbeck process that is robust to noise and works with irregularly spaced data. To demonstrate the advantages of this noise-robust approach, an intraday pairs trading strategy based on mean-variance optimization is presented. We examine seven major oil companies traded on the New York Stock Exchange throughout the turbulent period after Russias invasion of Ukraine in February 2022, marked by sharp increases in oil prices and stock volatility.

II. Methodology

Assume that the price of a portfolio of assets follows a continuous stochastic process $\{Y_t\}_{t\geq 0}$ satisfying

$$\mathrm{d}Y_t = \tau(\mu - Y_t)\mathrm{d}t + \sigma \mathrm{d}W_t, \tag{1}$$

where μ is the long-term mean, $\sigma > 0$ is the instantaneous volatility, $\tau > 0$ measures the speed of mean reversion, and $\{W_t\}_{t\geq 0}$ is the standard Wiener process. This is a mean-reverting process, known also as Ornstein–Uhlenbeck.

This research was supported by the Czech Science Foundation under projects 23-06139S.

The price equation (1) has a solution

$$Y_t = Y_0 e^{-rt} + \mu(1 - e^{-\tau t}) + \sigma \int_0^t e^{-\tau(t-s)}\, \mathrm{d}W_s.$$

If $Y_0 \sim N(\mu, \sigma^2/2\tau)$ and Y_0 is independent of W_t, then Y_t is stationary. The increments are normally distributed.

Consider two assets, A and B, with price processes $\{A_t\}_{t\geq 0}$ and $\{B_t\}_{t\geq 0}$. Assume that there exists a portfolio $A-\eta B$ such that its price process can be modeled as the mean-reverting process Y_t with parameters μ, σ, τ:

$$Y_t = A_t - \eta B_t.$$

Intuitively, disregarding the time value of money, the mean-reversion property permits what can be interpreted as a *free lunch*. When Y_t exceeds the mean level μ, a position consisting of $-A + \eta B$ (i.e., a short position in the portfolio) may be entered and held until Y_t returns to the mean level μ, at which point the position is closed. Due to the mean-reverting nature of the process, this reversion occurs within a finite time horizon, thereby allowing a *free-lunch* to be realized.

The intraday strategy proposed by [1] consists of the following steps:

1. Historical intraday prices are modeled. The parameters of the Ornstein–Uhlenbeck process are estimated separately for each asset pair and for each trading day. Days characterized by high mean-reversion speed and high volatility are considered to offer greater profit potential.
2. Time series models are employed to capture the time-varying nature of the estimated daily parameters. This facilitates the prediction of future parameter values. In other words, it is assumed that prices observed during a future trading day follow an Ornstein–Uhlenbeck process with the forecasted parameters.
3. Given a specific set of parameters for the Ornstein–Uhlenbeck process, the optimal entry and exit signals, as well as the expected profit and its variance, are determined for each pair on each day. Based on the predicted mean and variance of profit, a trading decision is made. If trading is deemed favorable, execution is governed by the optimal entry and exit signals.

A. Modeling Intraday Prices as the Mean-Reverting Process

We utilize the general form of the maximum likelihood estimator for an irregularly spaced Ornstein–Uhlenbeck process contaminated by noise, as derived in [1].

In practice, continuous paths of the process are not observed. Instead, the process Y_{T_i} is observed only at a finite number of discrete times, $0 = T_0 < T_1 < \ldots < T_n = 1$, where the observation times T_i are treated as deterministic. Without loss of generality, the analysis is restricted to the time interval $[0, 1]$. It is further assumed that the price process is contaminated by independent white noise, with $E_i \sim \mathrm{N}(0, \omega^2)$:

$$X_i = Y_{T_i} + E_i, \qquad i = 0, \ldots, n.$$

The maximum likelihood estimates are obtained by maximizing the logarithmic likelihood function for an irregularly spaced Ornstein–Uhlenbeck process contaminated by noise:

$$L(\mu, \tau, \sigma^2, \omega^2) = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \log\left(2\pi \mathrm{var}[X_i \mid X_{i-1} = x_{i-1}]\right) - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \frac{\left(x_t - \mathrm{E}[X_i \mid X_{i-1} = x_{i-1}]\right)^2}{\mathrm{var}[X_i \mid X_{i-1} = x_{i-1}]}$$

with conditional moments

$$\mathrm{E}[X_i \mid X_{i-1} = x_{i-1}] = \frac{x_{i-1}\sigma^2 + 2\tau\mu\omega^2}{\sigma^2 + 2\tau\omega^2} e^{-\tau(T_i - T_{i-1})} + \mu\left(1 - e^{-\tau(T_i - T_{i-1})}\right),$$

$$\mathrm{var}[X_i \mid X_{i-1} = x_{i-1}] = \frac{\sigma^2\omega^2}{\sigma^2 + 2\tau\omega^2} e^{-2\tau(T_i - T_{i-1})} + \frac{\sigma^2}{2\tau}\left(1 - e^{-2\tau(T_i - T_{i-1})}\right) + \omega^2.$$

The optimal solution is found iteratively using the Sbplx algorithm of [2], a variant of the Nelder–Mead algorithm, and the method of moments is used to obtain an initial solution [1].

B. Forecasting Parameter Values

The daily mean parameter μ_i is forecasted by an AR(1) process with the opening price $X_{0,i}$ on day i included as an exogenous variable:

$$\mu_i = a + b\mu_{i-1} + cX_{0,i} + \varepsilon_i;$$

the daily speed of reversion parameter τ_i is modeled as a constant equal to its mean value:

$$\tau_i = a' + \varepsilon_i';$$

the daily variance parameter σ_i^2 is modeled using the HAR model:

$$\ln\sigma_i^2 = a'' + b''\ln\sigma_{i-1}^2 + c''\frac{1}{5}\sum_{j=1}^{5}\ln\sigma_{i-j}^2 + d''\frac{1}{22}\sum_{j=1}^{22}\ln\sigma_{i-j}^2 + \varepsilon_i''$$

for $i = 1, \ldots, h$, where a, b, c, a', b', c', a'', b'', c'' and d'' are the coefficients, and ε_i, ε_i' and ε_i'' are the Gaussian white noises [1].

C. Optimizing Entry and Exit Signals

We utilize Bertrams pairs trading strategy [3], as extended in [1]. The geometric and optimization-theoretic viewpoints of this risk-bounded trading strategy are examined in the subsequent paper [4]. We mostly follow the notation of [4] to save space and omit details available in [1], while focusing more on optimization-theoretic insight.

The utilized pairs trading strategy follows these steps:

- From time $t = 0$, wait for time t_1 when $Y_{t_1} = a$ for a pre-specified entry level a satisfying $a > \mu$.
- Buy $-A + \eta B$. Mean reversion implies that A_t is expected to decrease and/or B_t to increase.
- Wait until time $t_2 > t_1$ when $Y_{t_2} = b$, where $b < a$ is a pre-specified exit level.
- In time t_2, close the positions. Assuming fixed costs per transaction c, the profit is

$$r = Y_{t_1} - Y_{t_2} - c = a - b - c.$$

- Then, wait until time $t_3 > t_2$ when $Y_{t_3} = a$ (second entry level) and repeat the strategy.

Note that the profit per trade cycle, $r = a - b - c$ is deterministic. What is random is the number of cycles occurring within the time interval $[0, t]$. Let the total profit over the interval $[0, t]$ be denoted by Π_t:

$$\Pi_t = rN_t = (a - b - c)N_t,$$

where N_t is the counting process for the number of trade cycles in time $[0, t]$. The mean profit per time unit and the variance of profit per time unit are defined as

$$\Pi = \lim_{t\to\infty} \frac{\mathsf{E}\Pi_t}{t}, \quad V = \lim_{t\to\infty} \frac{\mathsf{var}\,\Pi_t}{t}.$$

Given transaction costs c and parameters μ, σ, τ, η, the main goal is to determine the "optimal" entry level a and exit level b.

Let $\mathcal{T}$ denote the (random) duration of the trade cycle, i.e., the passage time of Y_t from a (entry level) to b (exit level) and back to a. Then

$$\Pi = \frac{r}{\mathsf{E}\mathcal{T}} = \frac{a - b - c}{\mathsf{E}\mathcal{T}}$$

and

$$\mathsf{E}\mathcal{T} = \sum_{k=1}^{\infty} \Gamma(k - \tfrac{1}{2}) \frac{(2^{1/2}a)^{2k-1} - (2^{1/2}b)^{2k-1}}{(2k-1)!}.$$

To maximize profit, set $\frac{\partial\Pi}{\partial a} = 0$, $\frac{\partial\Pi}{\partial b} = 0$. This yields implicit expressions for the optimal entry and exit levels, a^*, b^*.

Once the risk constraints are introduced, constrained optimization is required:

$$\max_{a,b} \Pi \quad \text{s.t.} \quad V \le v_0, \quad a - b - c \ge 0.$$

where $v_0 > 0$ is the allowed risk level.

Although the optimization problem appears complex:

$$\begin{aligned}
\Pi &= \frac{r}{\mathsf{E}\mathcal{T}} = \frac{a-b-c}{\mathsf{E}\mathcal{T}},\\
\mathsf{E}\mathcal{T} &= \sum_{k=1}^{\infty} \Gamma(k-\tfrac{1}{2}) \frac{(2^{1/2}a)^{2k-1} - (2^{1/2}b)^{2k-1}}{(2k-1)!},\\
V &= \frac{(a-b-c)^2}{(\mathsf{E}\mathcal{T})^3} \mathsf{var}\,\mathcal{T},\\
\mathsf{var}\,\mathcal{T} &= w_1(a) - w_1(b) - w_2(a) + w_2(b),\\
w_1(\xi) &= \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \Gamma(\tfrac{k}{2}) \frac{(2^{1/2}\xi)^k}{k!} \right)^2\\
&\quad - \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \Gamma(\tfrac{k}{2}) \frac{(-2^{1/2}\xi)^k}{k!} \right)^2,\\
w_2(\xi) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2^{1/2}\xi)^{2k-1}}{(2k-1)!} \Gamma(k-\tfrac{1}{2}) \psi(k-\tfrac{1}{2}),
\end{aligned}$$

where ψ is the digamma function, it turns out to exhibit interesting properties:

- Even under the risk constrain $V \leq v_0$, the optimal solution lies on the line $b = -a$.
- If $v_0 > v_0^*$, where v_0^* denotes the contour line of V passing through the maximizer of the mean profit Π, then the risk constraint can be ignored.

As noted by [4], in spite of the complexity of the optimization problem, geometric insight provides a straightforward method for a pairs trading strategy under the risk constraint $V \leq v_0$:

- Ignore the risk constraint and maximize the mean profit Π. Let a^*, $b^* = -a^*$ be the maximizer.
- If $V \equiv V(a^*, b^*) \leq v_0$, then stop, the strategy a^*, b^* is optimal.
- Otherwise, decrease a^* to the (unique) value a^{**} such that $V(a^{**}, b^{**} = -a^{**}) = v_0$.
- Stop, $a^{**}, b^{**} = -a^{**}$ is optimal.

III. Application to Intraday Oil Market

A. Data

We analyze high-frequency data for seven major oil company stocks traded on the New York Stock Exchange (NYSE). Among these, the stocks of Chevron (CVX), Phillips 66 (PSX), and ExxonMobil (XOM) are primarily listed on the NYSE, while the stocks of BP (BP), Eni (E), Royal Dutch Shell (RDS-A), and Total (TOT) are primarily listed on other exchanges and only secondarily listed on the NYSE.

Since all seven companies operate in the same industry and are significantly influenced by crude oil prices, some level of comovement in their stock prices is expected. These seven stocks can be combined into a total of 21 possible pairs for analysis.

While our study in [1] focused on a tranquil period between January 2, 2015, and June 29, 2018—spanning 880 trading days—now we base our analysis on a more recent period marked by turmoil. Our dataset covers March 1, 2022, to December 29, 2023, comprising 462 trading days. This was a time of significant disruption, as oil prices and stock market volatility spiked following Russia's invasion of Ukraine in late February 2022.

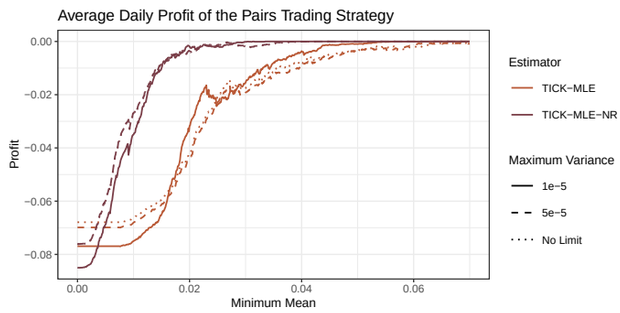


Fig. 1. Dependence of the daily profit on the maximum variance and minimum mean for the noise-sensitive and noise-robust estimators.

B. Results

The traditional maximum likelihood estimator for the Ornstein–Uhlenbeck process (ignoring microstructure noise) is compared to the noise-robust maximum likelihood estimator presented in Section II-A. The estimated means μ are quite similar for both the traditional and noise-robust methods, while the parameters τ and σ are significantly higher when estimated using the traditional method that ignores microstructure noise. On average, the speed of reversion τ is 2.37 times higher, and the standard deviation σ is 1.62 times higher (with the variance σ^2 being 2.56 times higher) when estimated by the traditional method.

The main finding is that the traditional method yields significantly biased estimates of τ and σ, and therefore, this estimator should be avoided. The noise-robust method, on the other hand, is unaffected by microstructure noise while utilizing all available tick data.

The importance of properly accounting for microstructure noise is further confirmed by executing a pairs trading strategy based on mean-variance optimization. Figure 1 demonstrates that the noise-robust estimator (TICK-MLE-NR) significantly outperforms the traditional estimator (TICK-ML). This occurs because optimization based on the traditional estimator identifies suboptimal entry and exit signals. In contrast, the noise-robust estimator determines optimal values, leading to smaller losses.

References

[1] Holý, Vladimír, and Petra Tomanová. "Estimation of ornstein-uhlenbeck process using ultra-high-frequency data with application to intraday pairs trading strategy." arXiv preprint arXiv:1811.09312, 2018.

[2] Rowan, Thomas Harvey. "Functional stability analysis of numerical algorithms." The University of Texas at Austin, 1990.

[3] Bertram, William K. "Analytic solutions for optimal statistical arbitrage trading." Physica A: Statistical mechanics and its applications, 2234-2243, 2010.

[4] Holý, Vladimír, and Michal Černý. "Bertram's pairs trading strategy with bounded risk." Central European Journal of Operations Research, 667-682, 2022.

Evaluación del Impacto de la Complementariedad Temporal Energética Eólico-Solar en el Diseño de Sistemas Híbridos de Energía Renovable Autónomos con Almacenamiento Utilizando Inteligencia Artificial

José Luis Muñoz-Pincheira
Doctor en Energía
Facultad de Ingeniería, UNAB
Concepción, Chile
jose.munoz@unab.cl

***Abstract*—La creciente penetración de energías renovables en los sistemas eléctricos plantea desafíos asociados a la intermitencia, los vertimientos y la congestión en transmisión, lo que afecta la eficiencia y la competitividad de las inversiones. En este contexto, la complementariedad temporal entre los recursos solar y eólico se presenta como un factor estratégico para garantizar la confiabilidad del suministro, reducir los requerimientos de almacenamiento y mejorar la economía de los sistemas.**

Esta tesis doctoral evalúa el impacto de la complementariedad temporal solar–eólica en el diseño óptimo de sistemas híbridos autónomos de energías renovables con almacenamiento (HRES), integrando análisis estadístico y metodologías de investigación de operaciones. Se realizó una caracterización de la complementariedad solar–eólica en Chile utilizando datos horarios (2004–2016), aplicando el coeficiente de Spearman y pruebas de significancia estadística. Los resultados se sintetizaron en un mapa estratégico de complementariedad que identifica las zonas con mayor sinergia entre recursos.

Posteriormente, se desarrolló un modelo de optimización en GNU Octave para el dimensionamiento de HRES, con el objetivo de minimizar el Costo Neto Actualizado (NPC) bajo una restricción de confiabilidad definida por la Probabilidad de Pérdida de Suministro (LPSP). El problema se resolvió mediante algoritmos genéticos, incluyendo análisis de sensibilidad sobre parámetros críticos como costo de baterías, tasa de descuento y LPSP máximo permitido.

Los resultados demuestran que en regiones con alta complementariedad solar–eólica es posible reducir el NPC y el LCOE en un 50%, mejorando significativamente la confiabilidad del suministro debido a menores requerimientos de almacenamiento. El estudio aporta contribuciones teóricas, metodológicas y aplicadas: demuestra que la complementariedad es un factor determinante en el diseño de HRES, presenta un marco de optimización reproducible y entrega el primer mapa nacional de complementariedad solar–eólica en Chile.

I. Introduction

La transición hacia una matriz energética 100% renovable enfrenta múltiples desafíos: la variabilidad de la generación solar y eólica, la concentración territorial y las limitaciones de transmisión. En Chile, estas condiciones han generado vertimientos que afectan la eficiencia del sistema [1], el cierre de centrales fotovoltaicas y desincentivos de inversiones en generación eléctrica. La tesis aborda estos problemas incorporando la complementariedad temporal solar-eólica como criterio de diseño de sistemas híbridos autónomos (HRES). Se demuestra que dicha complementariedad permite reducir costos, minimizar almacenamiento y mejorar la confiabilidad del suministro, aportando resiliencia y descentralización. Este enfoque es coherente con estudios recientes sobre descarbonización y flexibilidad energética [2], [3].

Objetivos

El objetivo principal de la tesis fue evaluar el impacto de la complementariedad temporal solar-eólica en el diseño de HRES autónomos con almacenamiento. Los objetivos específicos incluyeron: (i) caracterizar la complementariedad solar-eólica en Chile a partir de series horarias, (ii) formular un modelo de optimización de HRES autónomos considerando complementariedad, y (iii) analizar la aplicabilidad práctica de los resultados en contextos territoriales y comunitarios.

II. Revisión breve del estado del arte

La literatura sobre sistemas híbridos de energías renovables se ha enfocado en el desarrollo de metodologías de optimización y en el análisis de criterios económicos y técnicos. Entre los enfoques más comunes destacan la programación lineal y los modelos MILP para dimensionamiento óptimo de sistemas aislados [5], [8], así como la aplicación de metaheurísticas tales como algoritmos genéticos o PSO [7], [12]. Revisiones recientes han sistematizado estos métodos, resaltando la necesidad de incorporar criterios de confiabilidad y reducción de emisiones [6].

En paralelo, se ha desarrollado un cuerpo creciente de literatura sobre la complementariedad de recursos renovables. En [15] los autores realizan una revisión exhaustiva de métodos de mapeo de complementariedad solar-eólica, destacando su utilidad para la planificación energética. En [16] los autores

estudian la complementariedad y sinergias de la energía eó lica marina en Brasil, mientras que en [10] evalúan la complementariedad de recursos offshore en las costas españolas. En América Latina, los autores [9] analizaron la relevancia de la complementariedad frente al cambio climático [9].

A pesar de la creciente investigación a nivel mundial en el área de complementariedad energética y sistemas híbridos de energía, aún existía una brecha relevante: si bien se habían caracterizado las sinergias y aplicado modelos de optimización convencionales, no se había demostrado de manera cuantitativa cómo la incorporación explícita de métricas de complementariedad podía modificar las decisiones de diseño en sistemas híbridos autónomos. Esta tesis contribuyó a cerrar esa brecha al integrar, por primera vez, indicadores estadísticos de complementariedad en un modelo de optimización resuelto por algoritmos genéticos, evidenciando el impacto directo de dicha integración en el costo, el dimensionamiento de almacenamiento y en la confiabilidad del suministro, combinando estadística con investigación de operaciones aplicada a la energía.

III. Metodología

La metodología constó de dos etapas:

A. Etapa 1 — Análisis estadístico y geoespacial

Se procesaron más de 40 millones de datos horarios de irradiancia y viento desde el año 2004 al 2016 para todo el territorio nacional. Se calculó el coeficiente de Spearman [11] y se aplicaron pruebas de significancia y ANOVA para validar diferencias regionales. El resultado fue un mapa nacional de complementariedad temporal energética eólico-solar (ver Apéndice B, figura 2).

El coeficiente de Spearman se define como:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)}, \tag{1}$$

donde d_i es la diferencia entre los rangos de cada par de observaciones y n es el número de pares de datos. Este índice permitió cuantificar la correlación temporal entre irradiancia solar y velocidad del viento.

B. Etapa 2 — Optimización de HRES

1) Modelo matemático: El modelo formulado corresponde a un problema de optimización no lineal entera mixta (MINLP). La no linealidad proviene de las funciones cúbicas en la generación eólica y de las operaciones no lineales en el modelado de baterías (funciones min/max), mientras que la naturaleza entera surge del número discreto de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y bancos de baterías. La función objetivo es minimizar el costo neto presente (NPC), sujeto a restricciones de confiabilidad (LPSP), balance horario y límites operativos.

Función objetivo

$$\begin{aligned}\min\ NPC = {} & x_1 C_{PV} + x_2 C_{WT} + x_3 C_{Bat} \\ & + \big(OM_{PV}\, x_1 C_{PV} + OM_{Wind}\, x_2 C_{Wind}\big)\, FD\end{aligned} \tag{2}$$

Restricciones de confiabilidad y balance

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{24} D_t}{\sum_{t=1}^{24} C_{\text{load},t}} \cdot 100 \ \le\ LPSP_{\max} \tag{3}$$

$$D_t = \max\Big(0,\ C_{\text{load},t} - (E_{PV,t} + E_{WT,t} + E_{Bat,t})\Big), \quad \forall t \tag{4}$$

Generación fotovoltaica

$$E_{PV,t} = x_1\, I_t\, \eta_{PV}\, \phi_{PV}, \quad \forall t \tag{5}$$

$$N_{PV} = \frac{x_1}{K_{PV}} \tag{6}$$

Generación eólica

$$P_{WT,t}^{\text{single}} = \begin{cases} 0, \\ \kappa_{WT}\left(\dfrac{v_t - v_{\text{cut-in}}}{v_{\text{rated}} - v_{\text{cut-in}}}\right)^3 \eta_{WT}\phi_{WT}, \\ \kappa_{WT}\eta_{WT}\phi_{WT}, \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} v_t < v_{\text{cut-in}} \text{ o } v_t > v_{\text{cut-out}}, \\ v_{\text{cut-in}} \le v_t < v_{\text{rated}}, \\ v_{\text{rated}} \le v_t \le v_{\text{cut-out}}. \end{cases}$$

$$E_{WT,t}^{\text{single}} = P_{WT,t}^{\text{single}} \cdot 1\,\text{h} \tag{8}$$

$$E_{WT,t} = N_{WT}\, E_{WT,t}^{\text{single}}, \qquad N_{WT} = \frac{x_2}{K_{WT}} \tag{9}$$

Baterías y límites

$$\begin{aligned} E_{bat,t} &= \min\{\max(E_{bat,t}^{\text{pre}}, 0),\ x_3\}, \\ E_{bat,t}^{\text{pre}} &= E_{bat,t-1} + \eta_{bat}\, E_{total,t} - C_{\text{load},t}, \\ E_{curt,t} &= \max\{0,\ E_{bat,t}^{\text{pre}} - x_3\}. \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} 0 \le E_{bat,t} &\le x_3, \\ 0 \le P_{ch}(t) &\le P_{ch}^{\max}, \\ 0 \le P_{dis}(t) &\le P_{dis}^{\max}, \\ P_W(t) &\le P_{\text{rated}}\ (\text{con } v_{\text{cut-in}},\ v_{\text{rated}},\ v_{\text{cut-out}}). \end{aligned} \tag{11}$$

2) Metodología de optimización con algoritmos genéticos: El problema de optimización es clasificado como NP-hard, lo que imposibilita su resolución exacta a gran escala mediante técnicas determinísticas convencionales. Frente a esta dificultad, se optó por el uso de algoritmos genéticos (GA) como estrategia metaheurística, capaces de explorar de manera eficiente espacios de búsqueda no lineales y de gran dimensionalidad, aproximando soluciones de calidad en tiempos computacionales razonables.

El modelo matemático fue implementado en GNU Octave, integrando la formulación de la función objetivo y las restricciones de confiabilidad, balance y operación. La optimización se llevó a cabo mediante algoritmos genéticos [7], [12], ajustando parámetros de cruce, mutación y tamaño de población para asegurar convergencia estable. Adicionalmente, se efectuó un análisis de sensibilidad sobre variables críticas del sistema, tales como el costo de baterías, la tasa de descuento y el valor máximo admisible de LPSP, con el fin de evaluar la robustez de las soluciones obtenidas.

El procedimiento de optimización basado en *algoritmos genéticos (GA)* considera (ver Apéndice B, figura 1):

1) Inicialización de una población de soluciones candidatas (cromosomas) definidas por las variables de decisión x_1, x_2, x_3.
2) Evaluación de cada cromosoma calculando la energía generada ($E_{PV,t}, E_{WT,t}, E_{Bat,t}$), el déficit D_t, el índice de confiabilidad (LPSP) y la función objetivo (NPC).
3) Verificación de restricciones: solo las soluciones que cumplen $LPSP \leq LPSP_{max}$ continúan en el proceso evolutivo.
4) Aplicación de operadores genéticos: selección, cruce y mutación para generar nuevas soluciones.
5) Actualización de la población y almacenamiento de la mejor solución encontrada (P_{best}).
6) Iteración del procedimiento hasta alcanzar el número máximo de iteraciones o la convergencia en la función objetivo.

IV. Resultados principales

El primer hallazgo corresponde a la construcción del mapa nacional de complementariedad solar-eólica (ver Apéndice B, figura 2). A partir del análisis estadístico eólico-solar en el territorio nacional, se identificaron distintas zonas de complementariedad:

La **Zona A1** corresponde a la costa y los valles centrales del norte del país, desde la latitud 18°S hasta la latitud 36°S. Presenta una correlación positiva moderada, con una mediana de +0,44 y un rango intercuartílico de -0,3 a +0,87.

La **Zona A2** corresponde a la cordillera en el norte del país, abarcando desde la latitud 25°S hasta la latitud 33°S. Presenta una complementariedad negativa débil, con una mediana de -0,18 y un rango intercuartílico de -0,54 a +0,19.

La **Zona B**, correspondiente a la zona centro y sur del país, desde la latitud 36°S hasta la latitud 51°S, presenta una complementariedad negativa moderada, con una mediana de -0,18 y un rango intercuartílico de -0,54 a +0,32.

Finalmente, la **Zona C**, ubicada en el extremo sur del país, desde la latitud 51°S hasta la latitud 55°S, muestra una correlación positiva débil a nula, con una mediana de +0,05 y un rango intercuartílico de -0,1 a +0,29.

El segundo hallazgo corresponde a la **optimización de configuraciones HRES autónomas** considerando explícitamente la complementariedad temporal. Los resultados muestran que en zonas con alta complementariedad los costos (NPC y LCOE) se reducen hasta en un 50%, el tamaño de almacenamiento requerido es menor y la confiabilidad del suministro (LPSP) mejora significativamente (ver Apéndice C, tabla II).

V. Conclusiones y aportes

La investigación demuestra que la complementariedad temporal no es un parámetro secundario, sino un factor determinante en el dimensionamiento óptimo de HRES [14]. Se desarrolló un modelo reproducible en GNU Octave y se elaboró el primer mapa nacional de complementariedad solar-eólica en Chile, aplicable a planificación territorial, políticas públicas e inversión privada.

Además, de esta tesis se han derivado publicaciones científicas de alto impacto que consolidan su contribución académica: Muñoz-Pincheira et al. (2024) en *Energies* [13], donde se caracterizó la complementariedad solar–eólica en Chile, y Muñoz-Pincheira et al. (2025) en *Energy Conversion and Management* [14], donde se optimizó el diseño de HRES considerando explícitamente este factor. Estos trabajos evidencian la relevancia de los resultados tanto en la teoría como en la práctica de la investigación de operaciones aplicada a la energía.

References

[1] US EPA, "Centralized Generation of Electricity and its Impacts on the Environment," 2015.

[2] A. Sinha et al., "Diverse decarbonization pathways under near cost-optimal futures," *Nature Communications*, vol. 15, no. 8165, 2024.

[3] P. Vargas-Ferrer, E. Álvarez-Miranda, C. Tenreiro, and F. Jalil-Vega, "Assessing flexibility for integrating renewable energies into carbon neutral multi-regional systems: The case of the Chilean power system," *Energy for Sustainable Development*, vol. 70, pp. 442–455, 2022.

[4] J. L. Muñoz-Pincheira, *Evaluación del Impacto de la Complementariedad Temporal Energética Eólico-Solar en el Diseño de Sistemas Híbridos de Energía Renovable Autónomos con Almacenamiento Utilizando Inteligencia Artificial*, Univ. de Concepción, Tesis Doctoral, 2025.

[5] J. C. Alberizzi, M. Rossi, and M. Renzi, "A MILP algorithm for the optimal sizing of an off-grid hybrid renewable energy system in South Tyrol," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 21–26, 2020.

[6] M. D. A. Al-falahi, S. D. G. Jayasinghe, and H. Enshaei, "A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system," *Energy Conversion and Management*, vol. 143, pp. 252–274, 2017.

[7] J. L. Torres-Madroñero, C. Nieto-Londoño, and J. Sierra-Pérez, "Hybrid Energy Systems Sizing for the Colombian Context: A Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization Approach," *Energies*, vol. 13, no. 21, 2020.

[8] H. Abdellatif, M. N. Syed, M. I. Hossain, and M. A. Abido, "Standalone Hybrid Renewable Energy System Optimization Using Linear Programming," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, pp. 6361–6376, 2023.

[9] C. Viviescas et al., "Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, 2019.

[10] R. Vázquez, W. Cabos, J. C. Nieto-Borge, and C. Gutiérrez, "Complementarity of offshore energy resources on the Spanish coasts: Wind, wave, and photovoltaic energy," *Renewable Energy*, vol. 224, 2024.

[11] J. Santabárbara, "Cálculo del intervalo de confianza para los coeficientes de correlación mediante sintaxis en SPSS," *Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, vol. 12, 2019.

[12] S. Vendoti, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, "GA Based Optimization of an Stand-alone Hybrid Renewable Energy System for Electrification in a Cluster of Villages in India," in *Proc. ICONSTEM*, 2019.

[13] J. L. Muñoz-Pincheira, L. Salazar, F. Sanhueza, and A. Lüer-Villagra, "Temporal Complementarity Analysis of Wind and Solar Power Potential for Distributed Hybrid Electric Generation in Chile," *Energies*, vol. 17, no. 8, 1890, 2024.

[14] J. L. Muñoz-Pincheira et al., "Optimizing the design of stand-alone hybrid renewable energy systems with storage using genetic algorithms: Analysis of the impact of temporal complementarity of wind and solar sources," *Energy Conversion and Management*, vol. 341, 120016, 2025. doi:10.1016/j.enconman.2025.120016.

[15] Pedruzzi, R., Silva, A. R., Soares dos Santos, T., Araujo, A. C., Cotta Weyll, A. L., Lago Kitagawa, Y. K., Nunes da Silva Ramos, D., Milani de Souza, F., Almeida Narciso, M. V., Saraiva Araujo, M. L., Medrado, R. C., Camilo Júnior, W. O., Neto, A. T., de Carvalho, M., Pires Bezerra, W. R., Costa, T. T., Bione de Melo Filho, J., Bandeira Santos, A. Á., Moreira, D. M. (2023). Review of mapping analysis and

complementarity between solar and wind energy sources. Energy, 283, 129045. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129045

[16] Nogueira, E. C., Morais, R. C., Pereira, A. O. (2023). Offshore Wind Power Potential in Brazil: Complementarity and Synergies. Energies, 16(16), Article 16. https://doi.org/10.3390/en16165912

APPENDIX A
ANEXOS
NOMENCLATURA

Símbolo	**Descripción**	**Unidades**
x_1	Capacidad fotovoltaica instalada	kWp
x_2	Capacidad eólica instalada	kW
x_3	Capacidad total de almacenamiento (baterías)	kWh
N_{PV}	Número de módulos FV	–
N_{WT}	Número de aerogeneradores	–
N_{BS}	Número de baterías	–
K_{PV}	Potencia nominal por módulo FV	kWp/módulo
K_{WT}	Potencia nominal por aerogenerador	kW/turbina
K_{BS}	Capacidad nominal por batería	kWh/batería
NPC	Costo Neto Presente	$
$LCOE$	Costo Nivelado de Energía	$/kWh
OM_{PV}	Costo O&M FV (factor)	–
OM_{Wind}	Costo O&M eólico (factor)	–
C_{PV}	Costo unitario de inversión FV	$/kWp
C_{WT}	Costo unitario de inversión eólica	$/kW
C_{Bat}	Costo unitario de baterías	$/kWh
FD	Factor de descuento acumulado	–
r	Tasa de descuento anual	%
L	Vida útil del proyecto	años
$LPSP$	Probabilidad de Pérdida de Suministro (confiabilidad)	%
$LPSP_{\max}$	Límite máximo de LPSP	%
D_t	Déficit horario de energía	kWh
$C_{\text{load},t}$	Demanda/carga en la hora t	kWh
$E_{PV,t}$	Energía generada por FV en la hora t	kWh
$E_{WT,t}$	Energía generada por eólico en la hora t	kWh
$E_{bat,t}$	Energía almacenada en baterías al final de la hora t (SOC)	kWh
$E_{bat,t}^{pre}$	Energía intermedia de baterías antes de límites en la hora t	kWh
$E_{curt,t}$	Energía vertida en la hora t	kWh
$E_{total,t}$	Energía total de generación renovable en t ($E_{PV,t} + E_{WT,t}$)	kWh
$P_{PV}(t)$	Potencia FV instantánea	kW
$P_W(t)$	Potencia eólica instantánea	kW
$P_{ch}(t)$	Potencia de carga de baterías	kW
$P_{dis}(t)$	Potencia de descarga de baterías	kW
P_{rated}	Potencia nominal de la turbina	kW
I_t	Irradiancia efectiva en la hora t (o recurso solar)	W/m^2
η_{PV}	Eficiencia del sistema FV (global)	–
ϕ_{PV}	Factor de disponibilidad FV	–
κ_{WT}	capacidad característica de la turbina (escala)	kW
η_{WT}	Eficiencia del tren eólico (global)	–
ϕ_{WT}	Factor de disponibilidad eólico	–
v_t	Velocidad del viento en la hora t	m/s
$v_{\text{cut-in}}$	Velocidad de arranque de la turbina	m/s
v_{rated}	Velocidad a potencia nominal	m/s

Símbolo	Descripción	Unidades
$v_{\text{cut-out}}$	Velocidad de corte de la turbina	m/s
η_{bat}	Eficiencia de carga/descarga de baterías	–
$P_{ch}^{\max}$, $P_{dis}^{\max}$	Límite de potencia de carga/descarga	kW
ρ	Coeficiente de correlación de Spearman (complementariedad)	–

APPENDIX B
FIGURES

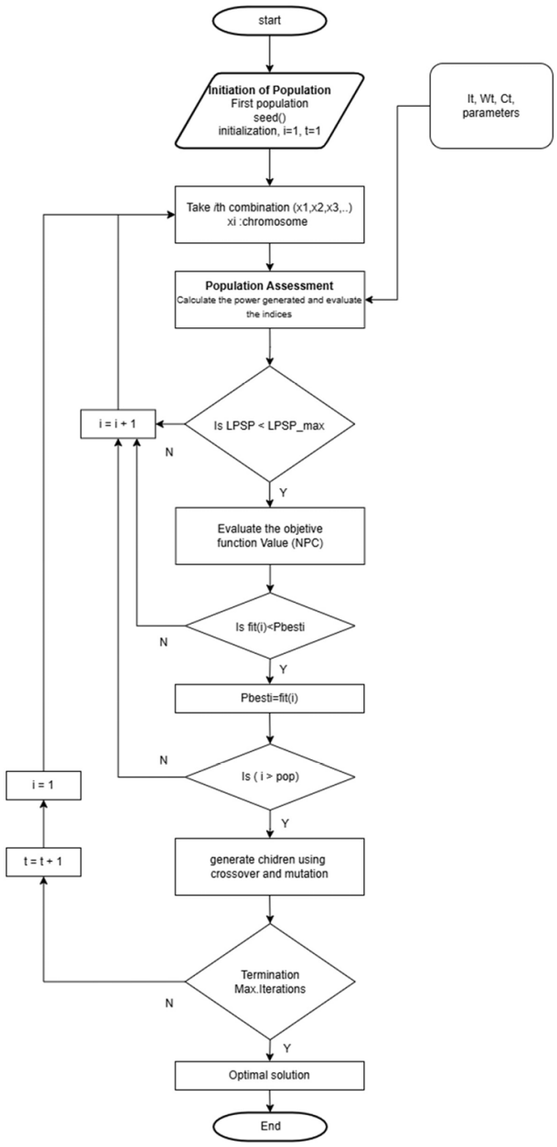


Fig. 1: Diagrama de flujo del procedimiento de optimización mediante algoritmos genéticos (codificación de (x_1, x_2, x_3), evaluación por LPSP y NPC, selección, cruce, mutación y criterio de término).

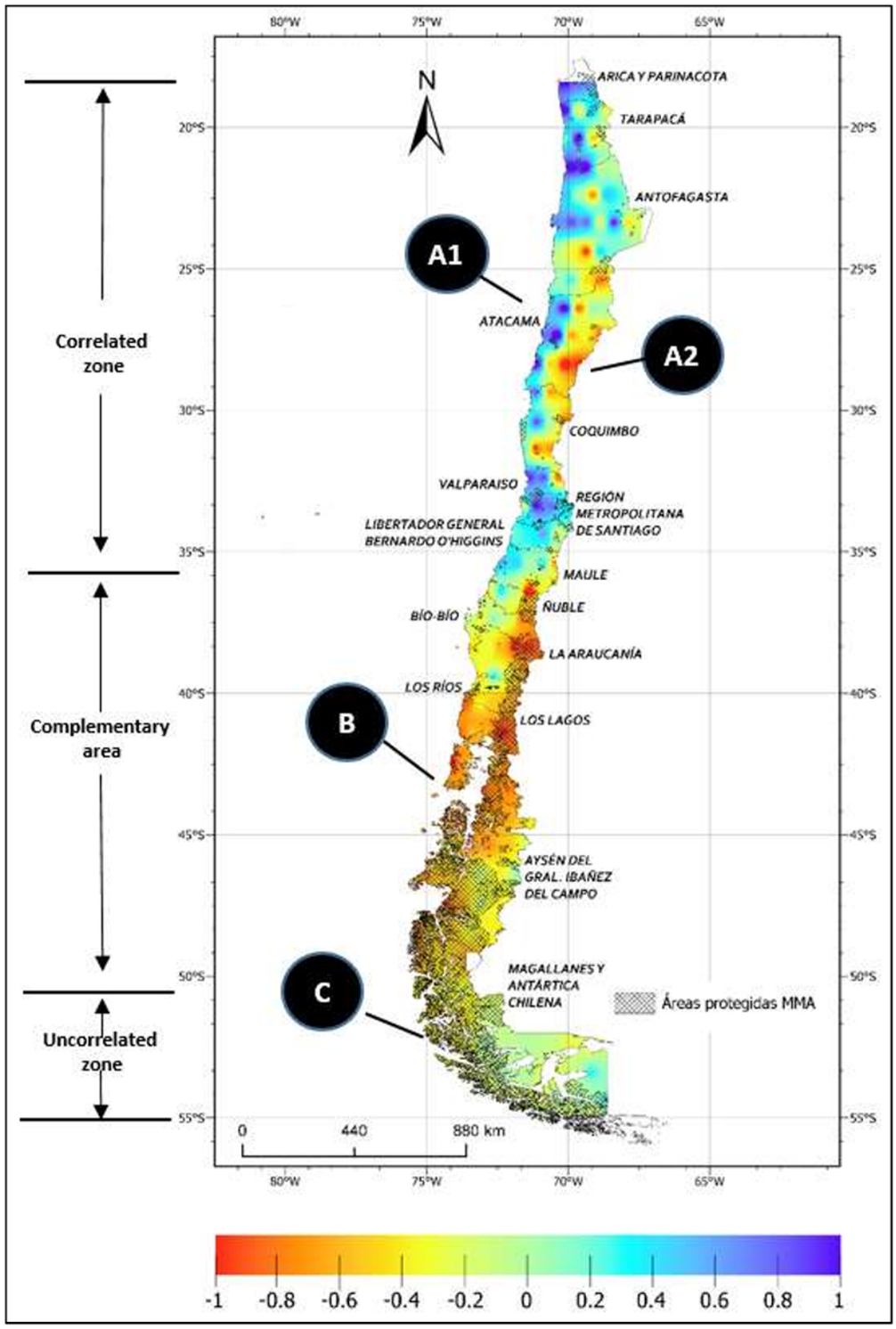


Fig. 2: Mapa nacional de complementariedad temporal energética solar–eólica elaborado en la tesis. Fuente: propia.

APPENDIX C
TABLES

TABLE II: Resultados de la optimización de un HRES bajo distintos grados de complementariedad solar–eólica (adaptado de la tesis).

Variable o indicador	**Unidad**	$\boldsymbol{\rho = 0.95}$	$\boldsymbol{\rho = 0.54}$	$\boldsymbol{\rho = -0.29}$	$\boldsymbol{\rho = -0.63}$	$\boldsymbol{\rho = -0.95}$
x_1	kWp	4,125	303	1,287	1,088	692
x_2	kW	36,371	5,189	3,557	4,517	2,224
x_3	kWh	237	7,673	1,566	958.59	1,678
N_{PV}	-	10,314	757	3,219	2,722	1,731
N_{WT}	-	364	52	36	46	23
N_{BS}	-	24	768	157	96	168
NPC	$	67,234,821	10,428,003	7,769,391	9,116,993	4,839,986
LCOE	$/kWh	0.8183	1.3543	0.6566	0.782	0.6279
LPSP	%	14.71	4.24	3.3	3.66	2.45
D	kWh	16,790	0	0	205.06	0

Session N°5 – Track N°3

OR Applications in Healthcare

Chair: Olivares, M. *(Universidad de Chile)*
Place: G6-055
Time: 08:30 – 09:45

Comparación de Modelos Predictivos para Anticipar la Ocupación de Camas por Enfermedades Respiratorias en un Hospital Público Chileno

Time: 08:30 – 08:45
Authors:

- Valenzuela-Núñez, C. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Troncoso-Espinosa, F. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Linfati, R. *(Universidad del Bío-Bío)*

Calibration of a Mammography-Based Breast Cancer Predictive Model on the Chilean Population

Time: 08:50 – 09:05
Authors:

- Kauer, D. *(Universidad de Chile)*
- Aguirre, B. *(Ministerio de Salud de Chile)*
- Marín, A. *(Universidad de Chile)*
- Mondschein-Prieto, S. *(Universidad de Chile)*

Asignación Inteligente de Citas Médicas Basada en Riesgo Clínico y Propensión a la Asistencia

Time: 09:10 – 09:25
Authors:

- Troncoso-Espinosa, F. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Latorre-Núñez, G. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Valenzuela-Núñez, C. *(Universidad del Bío-Bío)*
- San-Martín-Durán, J. *(Universidad del Bío-Bío)*

Behavioral Nudges to Reduce Patient No-shows and Increase Capacity Utilization in Medical Appointments

Time: 09:30 – 09:45
Authors:

- Olivares, M. *(Universidad de Chile)*
- Schwartz, D. *(Universidad de Chile)*

Comparación de modelos predictivos para anticipar la ocupación de camas por enfermedades respiratorias en un hospital público chileno

Catalina Valenzuela-Núñez
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad del Bío-Bío,
Concepción, Chile.
cvalenzuelan@ubiobio.cl

Fredy Troncoso Espinosa
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad del Bío-Bío,
Concepción, Chile.
ftroncos@ubiobio.cl

Rodrigo Linfati
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad del Bío-Bío,
Concepción, Chile.
rlinfati@ubiobio.cl

***Abstract*—**En temporadas de invierno, los centros hospitalarios públicos se encuentran con una elevada demanda de camas debido al incremento de enfermedades respiratorias estacionales. El objetivo de este estudio es contrastar modelos convencionales de series de tiempo (ARIMA, SARIMA) con modelos de aprendizaje automático (SimpleRNN, LSTM y GRU) con el fin de estimar la ocupación semanal de camas en un hospital público en Chile. Estos modelos se entrenaron con datos históricos mediante una partición temporal de entrenamiento entre 2016 y 2018, con prueba en el 2019. Los resultados para los próximos tres meses, indican que LSTM y GRU llegan a un R^2 de 0,83, capturando correctamente la estacionalidad y la dinámica del fenómeno. Por otro lado, los modelos tradicionales mostraron un R^2 negativo, lo que indicaría una capacidad reducida para explicar la variabilidad de los datos. Esta diferencia demuestra que, aunque ARIMA y SARIMA pueden ajustarse adecuadamente a los datos, los enfoques basados en inteligencia artificial logran una representación más realista de los patrones complejos. Por lo tanto, la implementación de estos modelos representa una herramienta prometedora para la planificación hospitalaria y aportar de manera significativa en la gestión de recursos en salud pública.

Keywords—ocupación de camas, predicción, aprendizaje automático, series de tiempo

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Calibration of a Mammography-Based Breast Cancer Predictive Model on the Chilean Population

Diego Kauer*, Bernardita Aguirre¶, Arnaldo Marín†‡, Susana Mondschein*†§

*Industrial Engineering Department, University of Chile, Santiago, Chile
†Center for Cancer Prevention and Control (CECAN), Santiago, Chile
‡Departamento de Oncología Básico-Clínico, Universidad de Chile, Santiago, Chile
§Complex Engineering Systems Institute, Santiago, Chile
¶Hospital Digital, Ministerio de Salud, Santiago, Chile
Email: diego.kauer@ug.uchile.cl

***Abstract*—Breast cancer remains the leading cause of cancer-related mortality among women in Chile. While risk prediction models like Mirai [1] offer the promise of personalized screening based on mammographic images, their generalizability to diverse clinical settings with heterogeneous imaging hardware remains unclear. A total of 166,569 mammograms from 78,806 patients were used to assess Mirai's 5-year breast cancer risk prediction. Performance was measured using the concordance index (C-Index), which compared results across manufacturers with those from radiologist BI-RADS assessments for the initial evaluation. Two calibration strategies were tested: final-layer calibration and end-to-end fine-tuning. The original Mirai model achieved a C-Index of 0.84 (0.82-0.87) on Hologic machines but underperformed on other machines, in some cases, below radiologist assessments. End-to-end fine-tuning yielded the best results, with a C-Index of 0.82 (0.80-0.83) across the entire dataset. Our findings highlight the importance of domain adaptation when deploying AI models in real-world, heterogeneous health systems. Fine-tuning substantially mitigates hardware-related performance disparities, supporting the need for local calibration prior to clinical integration.**

***Index Terms*—Artificial Intelligence, Deep learning, Breast cancer, Risk prediction**

I. Introduction

Breast cancer is the most common and deadliest cancer among women worldwide, with over 2.2 million cases and 660,000 deaths in 2020. In Chile, it is also the leading cause of cancer death in women, with a mortality rate of 18.2 per 100,000—comparable to the South American and global rates of 19.5 and 17.0, respectively [2]. Recent data show an 18.1% increase in mortality from 2007 to 2018, reaching 16.3 deaths per 100,000 in 2018 [3]. Although mammography screening is known to reduce mortality through early detection [4], its implementation across Chile remains inconsistent and understudied.

Efforts have been made to screen breast cancer in the female population more effectively. Current guidelines include multiple public awareness campaigns and bi-yearly mammography for women between 50 and 74 years old. Recently, the Health Intendent issued a memo allowing women aged 50-59 to undergo mammography without a previous medical consultation and at no cost every three years [5].

However, the increased screening of breast cancer has put a strain on the public health system, where there is a lack of radiology specialists, especially in more remote regions of the country. This led to the creation of a new department within the Ministry of Health, called Hospital Digital (HD), where a team of specialized radiology specialists receives mammograms from over 47 public health providers across most regions of the country. There is substantial heterogeneity in the imaging equipment used across the public health system.

A. Risk prediction models

A substantial body of literature exists on risk prediction models for breast cancer [6]. Among them, Tyrer-Cuzick [7] and Gail [8] models are considered the state-of-the-art. These models have traditionally relied on logistic regression or Cox proportional hazards models, using predictors derived from environmental, behavioral, genetic, and demographic variables, typically obtained through cohort or case-control studies.

More recently, advances in machine learning and data science have enabled the development of risk prediction models that incorporate medical imaging data using artificial intelligence (AI). These models offer the potential to extract and integrate complex imaging features that are not accessible through conventional clinical evaluation, thus enhancing predictive accuracy. For example, Mirai [1], which predicts a woman's 5-year risk of developing breast cancer from a single mammogram without needing traditional risk factors.

B. Mirai

Unlike traditional risk models that rely heavily on genetic and behavioral factors, Mirai analyzes mammographic images through a Deep Learning Neural Network to predict short-term and long-term breast cancer risk. It was trained on a large dataset from the Massachusetts General Hospital (USA) and was validated on datasets from Chang Gung Memorial Hospital (Taiwan) and Karolinska, Sweden. It performed relatively well, with Concordance Index [9] (C-Index) of 0.76, 0.81, and 0.79 for the respective test sets [1].

Mirai has also been previously validated on external datasets

TABLE I
EXAMINATIONS BY MAMMOGRAPHY MANUFACTURER

Machine Manufacturer	Patients	Examinations	5-year positive examinations
Hologic	28,175 (35.75%)	60,818 (36.51%)	286 (1.02%)
Siemens	15,360 (19.49%)	33,557 (20.15%)	128 (0.83%)
General Electric	11,404 (14.47%)	23,471 (14.09%)	77 (0.68%)
Planmed	7,127 (9.04%)	15,089 (9.06%)	59 (0.83%)
Giotto	5,406 (6.86%)	12,313 (7.39%)	65 (1.2%)
Fujifilm	5,050 (6.41%)	10,318 (6.19%)	47 (0.93%)
Metaltronica	3,817 (4.84%)	8,119 (4.87%)	16 (0.42%)
Unknown	2,467 (3.13%)	2,884 (1.73%)	15 (0.61%)
Total	78,806 (100%)	166,569 (100%)	693 (0.88%)

and institutions, including Novant (USA), Emery (USA), Maccabi-Assuta (Israel), and Barretos (Brazil), with a C-Index of 0.75, 0.77, 0.77, and 0.84, respectively, where no further calibration was done [10]. Mirai's capability of generalizing to unseen populations is well-known, but whether the model can understand mammographies captured from different domains (machine manufacturers) is unclear.

The original model training and all subsequent validations were performed using datasets collected from images obtained with HOLOGIC devices [10]. This contrasts with the situation in Chile, where a multitude of mammography devices from different manufacturers are available. In this study, we aim to evaluate the performance of the model when considering the manufacturer of the mammography device. To ensure a proper adaptation to the Chilean population, the model requires fine-tuning.

II. METHODS

Retrospective validation and calibration were performed using a database collected from mammograms processed in the HD.

A. Selection and Description of Participants

We selected patients who had at least two mammograms between July 2019 and May 2024, resulting in 166,569 exams from 78,806 patients. Exams with fewer than four images were excluded. Cancer outcomes were sourced from a biopsy registry. For calibration, the whole dataset was split patient-wise into training (70%), testing (15%), and development (15%) subsets. We selected examinations from all available manufacturers, as seen in Table I. Images, where the mammography machine manufacturer was not present in the DICOMs metadata were labeled as Unknown.

B. Model Evaluation

For the initial evaluation, the standard Mirai architecture, as shown in Figure 1, was used. The four standard mammographic images (craniocaudal and mediolateral-oblique views of the right and left breast) are encoded into a dense latent representation using convolutional neural networks (CNNs) built on the base of ResNet-18, which is trained to identify imaging features associated with future disease development. The images are aggregated into a unified exam-level embedding. The model integrates additional clinical and demographic features (e.g., age, family history) through a parallel input branch. It estimates the probability of disease within 5 years, supporting longitudinal risk assessment. Performance is evaluated using ROC-AUC for 1- to 5-year windows and the C-Index.

Due to the lack of patient metadata, state-of-the-art risk models, such as the Tyrer-Cuzick model, could not be computed. However, to establish a baseline for the prediction, the radiologist's BI-RADS assessment is compared to the model's results.

C. Model Calibration

For the calibration, only the training dataset was used to update the model's weights. In contrast, the development set was used to fine-tune the hyperparameters, and the testing set was used for the final model evaluation.

Two training schemes have been adopted to calibrate Mirai. The first consists of freezing the weights of the Encoder, Aggregator, and Risk Factor Prediction layers while updating the weights of the Additive Risk Layer. This implies that the frozen modules, which encompass encoding and aggregation, are capable of generalizing to unseen domains. The second scheme consists of fine-tuning Mirai end-to-end while keeping the risk-factor prediction module frozen. The assumption here is that the Encoder can only find a good representation of the mammography images exclusively when they come from an Hologic machine, and the parameters of the encoding model need to be updated to improve the prediction.

III. RESULTS

For the results of the evaluation, as shown in Table II, the first assessment yielded results consistent with previous validations, with a C-Index of 0.74 (0.72-0.76). When analyzing the results by manufacturer, we can see the excellent performance of Hologic machines with a C-Index of 0.84 (0.82-0.87). However, when examining other manufacturers, Siemens and General Electric demonstrate improved performance compared to the radiologists' assessment, but fall below Hologic, with 0.75 (0.71-0.78) and 0.73 (0.69-0.78), respectively. On the other hand, Planmed, Giotto, Fujifilm, Metaltronica, and Unknown had a subpar performance with C-index of 0.56 (0.50-0.62), 0.54 (0.46-0.62), 0.46 (0.39-0.53), 0.65 (0.54-0.78), and 0.64 (0.53-0.77), respectively. Among these manufacturers, only Metaltronica demonstrated superior performance compared to the standard radiologist review. All 95% CIs were calculated using bootstrapping with 1000 resamples.

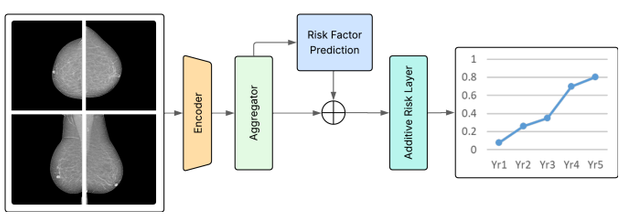


Fig. 1. Mirai model architecture, adapted from [1].

TABLE II
EVALUATION AND CALIBRATION RESULTS

	5-year C-Index			
Machine Manufacturer	Radiologist BIRADS	Initial Evaluation	Final layer calibration	End-to-end calibration
Hologic	0.66 (0.63-0.69)	0.84 (0.82-0.87)	0.82 (0.80-0.84)	0.84 (0.82-0.86)
Siemens	0.64 (0.61-0.67)	0.75 (0.71-0.78)	0.77 (0.74-0.81)	0.82 (0.79-0.85)
General Electric	0.60 (0.56-0.65)	0.73 (0.69-0.78)	0.74 (0.70-0.79)	0.83 (0.78-0.86)
Planmed	0.70 (0.63-0.76)	0.56 (0.50-0.62)	0.77 (0.71-0.82)	0.73 (0.66-0.80)
Giotto	0.75 (0.69-0.79)	0.54 (0.46-0.62)	0.69 (0.65-0.76)	0.79 (0.75-0.83)
Fujifilm	0.71 (0.66-0.77)	0.46 (0.39-0.53)	0.78 (0.72-0.84)	0.83 (0.78-0.90)
Metaltronica	0.60 (0.47-0.73)	0.65 (0.54-0.78)	0.66 (0.55-0.76)	0.72 (0.60-0.87)
Unknown	0.64 (0.54-0.74)	0.64 (0.53-0.77)	0.78 (0.69-0.85)	0.79 (0.65-0.93)
Total	0.66 (0.64-0.68)	0.74 (0.72-0.76)	0.78 (0.77-0.80)	0.82 (0.80-0.83)

Following the first calibration scheme, improvements were observed across the board, with a dataset-wide C-Index of 0.78 (0.77-0.80). When analyzing by machine manufacturer, all the subpar manufacturers improved, and noticeably, the Hologic examinations saw a decrease to a C-Index of 0.82 (0.80-0.84). This suggests that the exam-level representation contains relevant predictive information, though potentially mixed with noise. The calibration of the Risk Prediction Layer leverages that information to remove the noise and improve the baseline prediction. However, a noticeable difference still exists between the Hologic devices and the rest of the machines. This is expected, as the dense representation of the examination is tailored to Hologic machines. All results performed better than the radiologist's BI-RADS assessment. The final calibration scheme yielded results that improved on the initial evaluation and the first calibration scheme. The C-Index of the end-to-end calibration was 0.82 (0.80-0.83). Notably, there was a significant improvement in the performance of Siemens, General Electric, Giotto, and Fujifilm, without compromising the C-Index of Hologic examinations.

IV. CONCLUSION AND DISCUSSION

This study assessed the generalization and calibration of the Mirai breast cancer risk model using a large, diverse dataset from Chile's public healthcare system, with a focus on differences by mammography machine manufacturer. Trained initially on Hologic images, Mirai performed well on similar data in our set (C-Index 0.84) but showed significant performance drops on images from other manufacturers, sometimes underperforming compared to BI-RADS assessments.

These findings demonstrate that, although Mirai generalizes well across regions, its performance is influenced by differences in imaging hardware. This dependency highlights the necessity for local validation and adaptation prior to large-scale deployment in diverse settings, such as Chile's public health system, where equipment varies significantly.

We explored two calibration strategies to address this issue. The first, fine-tuning only the final risk layer, improved performance across manufacturers but slightly reduced Hologic's performance, indicating a trade-off between generalization and device-specific optimization. The second, end-to-end calibration, further improved performance, reaching a global C-Index of 0.82, with notable gains for non-Hologic devices while preserving strong Hologic results. These findings highlight the importance of domain adaptation techniques to ensure equitable and effective AI use in medical imaging.

Future research should explore dynamic screening, adapting high-risk thresholds based on resources, patient history, or population risk trends. Incorporating past mammograms could improve risk estimates by tracking changes over time. A prospective study in real-world settings is essential to assess the model's impact on diagnostics, outcomes, and system efficiency.

REFERENCES

[1] A. Yala, P. G. Mikhael, F. Strand, G. Lin, K. Smith, Y.-L. Wan, L. Lamb, K. Hughes, C. Lehman, and R. Barzilay, "Toward robust mammography-based models for breast cancer risk," *Science Translational Medicine*, vol. 13, no. 578, p. eaba4373, Jan. 2021.

[2] J. Ferlay J, M. Ervik, F. Lam, M. Laversanne, M. Colombet, L. Mery, M. Piñeros, A. Znaor, I. Soerjomataram, and F. Bray, "Global Cancer Observatory: Cancer Today," https://gco.iarc.who.int/today/, 2024.

[3] B. Madariaga, S. Mondschein, and S. Torres, "Breast cancer trends in Chile: Incidence and mortality rates (2007–2018)," *PLOS Global Public Health*, vol. 4, no. 6, p. e0001322, Jun. 2024.

[4] P. C. Gøtzsche and K. J. Jørgensen, "Screening for breast cancer with mammography," *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, vol. 2013, no. 6, p. CD001877, Jun. 2013.

[5] Subsecretaría de Salud Pública, "Guía de Práctica Clínica AUGE Cáncer de Mama," Nov. 2015.

[6] J. Louro, M. Posso, M. Hilton Boon, M. Román, L. Domingo, X. Castells, and M. Sala, "A systematic review and quality assessment of individualised breast cancer risk prediction models," *British Journal of Cancer*, vol. 121, no. 1, pp. 76–85, Jul. 2019.

[7] J. Tyrer, S. W. Duffy, and J. Cuzick, "A breast cancer prediction model incorporating familial and personal risk factors," *Statistics in Medicine*, vol. 23, no. 7, pp. 1111–1130, Apr. 2004.

[8] M. H. Gail, L. A. Brinton, D. P. Byar, D. K. Corle, S. B. Green, C. Schairer, and J. J. Mulvihill, "Projecting Individualized Probabilities of Developing Breast Cancer for White Females Who Are Being Examined Annually," *JNCI Journal of the National Cancer Institute*, vol. 81, no. 24, pp. 1879–1886, Dec. 1989.

[9] H. Uno, T. Cai, M. J. Pencina, R. B. D'Agostino, and L. J. Wei, "On the C-statistics for evaluating overall adequacy of risk prediction procedures with censored survival data," *Statistics in Medicine*, vol. 30, no. 10, pp. 1105–1117, May 2011.

[10] A. Yala, P. G. Mikhael, F. Strand, G. Lin, S. Satuluru, T. Kim, I. Banerjee, J. Gichoya, H. Trivedi, C. D. Lehman, K. Hughes, D. J. Sheedy, L. M. Matthis, B. Karunakaran, K. E. Hegarty, S. Sabino, T. B. Silva, M. C. Evangelista, R. F. Caron, B. Souza, E. C. Mauad, T. Patalon, S. Handelman-Gotlib, M. Guindy, and R. Barzilay, "Multi-Institutional Validation of a Mammography-Based Breast Cancer Risk Model," *Journal of Clinical Oncology: Official Journal of the American Society of Clinical Oncology*, vol. 40, no. 16, pp. 1732–1740, Jun. 2022.

Asignación Inteligente de Citas Médicas Basada en Riesgo Clínico y Propensión a la Asistencia

Fredy Troncoso-Espinosa
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
ftroncos@ubiobio.cl

Guillermo Latorre-Núñez
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
glatorre@ubiobio.cl

Catalina Valenzuela-Núñez
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
cvalenzuelan@ubiobio.cl

Juan San Martín-Durán
Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
juan.san1602@alumnos.ubiobio.cl

***Abstract*—Una programación médica inteligente puede marcar una diferencia sustancial en la calidad de la atención de los pacientes y en la prevención de riesgos sanitarios. Utilizando la probabilidad de desarrollar enfermedades y la tendencia a asistir a citas, el sistema propuesto busca priorizar estratégicamente a los pacientes con mayor riesgo, evitando así que condiciones graves evolucionen por falta de atención oportuna. El proceso parte de la creación de un modelo de optimización que usa valores iniciales estimados de dichas probabilidades para diseñar una programación base eficiente. Luego, mediante algoritmos de machine learning aplicados a los registros históricos de los pacientes, se refinan esas estimaciones, permitiendo una asignación de citas más personalizada y ajustada al riesgo real de cada persona. Los análisis muestran que este modelo supera significativamente a los métodos tradicionales basados en asignación aleatoria, los cuales reflejan el funcionamiento actual de muchos centros de salud. Los pacientes seleccionados por el modelo inteligente exhiben mayores probabilidades tanto de requerir atención médica como de asistir efectivamente, lo que permite un uso más eficiente de los recursos disponibles. Además, pruebas estadísticas avalan su rendimiento, evidenciando mejoras significativas respecto al enfoque convencional. Este sistema resalta cómo la integración de datos clínicos reales y simulados puede mejorar la precisión de las predicciones y optimizar la gestión de citas médicas.**

***Index Terms*—Análisis predictivo, gestión de la atención en salud, planificación inteligente, probabilidad de asistir, probabilidad de enfermarse.**

I. INTRODUCCIÓN

La programación eficiente de citas médicas es fundamental en los centros de salud, ya que permite coordinar adecuadamente recursos como personal clínico, equipamiento y espacios de atención. Un mal manejo de los tiempos puede generar esperas excesivas, afectando la percepción de calidad del servicio por parte de los pacientes [1], lo que resalta la necesidad de utilizar los recursos disponibles de manera óptima [2].

Uno de los mayores desafíos en la gestión hospitalaria es coordinar horarios de atención considerando, además, la probabilidad de inasistencia, ya que estas ausencias no solo comprometen la salud del paciente, sino también el flujo general del sistema [3]. Anticipar y mitigar este fenómeno es clave para mejorar la eficiencia operativa y la atención centrada en el usuario.

Las enfermedades no transmisibles (ENT), como la hipertensión, diabetes, enfermedades cardiovasculares y anemia, requieren control continuo. La falta de seguimiento puede derivar en condiciones graves o crónicas, mientras que los chequeos regulares permiten intervenciones tempranas que mejoran los resultados clínicos [4]. Estas enfermedades representan una alta carga global, siendo responsables del 41% de las muertes anuales, donde las ECV lideran con un 51,7% [5], [6]. Sin embargo, la predicción precisa de estas condiciones aún enfrenta limitaciones de información.

La inasistencia también contribuye a la ineficiencia del sistema, aumentando los tiempos de espera y desviando pacientes hacia el sector privado, donde los tiempos suelen ser menores [7]. Esto refleja las deficiencias en los métodos actuales de agendamiento [8].

Frente a este contexto, se propone un sistema inteligente de programación de citas que integra aprendizaje automático para predecir la propensión de cada paciente a enfermar (Prdis) y a asistir a sus controles (Prap). El modelo asigna citas presenciales a pacientes con alta probabilidad de asistencia y enfermedad, y visitas domiciliarias a aquellos con bajo compromiso de asistencia pero alto riesgo clínico. Este enfoque busca reducir las inasistencias, priorizar la atención de pacientes de alto riesgo y mejorar la eficiencia del sistema sanitario.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Programación de citas médicas

Las inasistencias de pacientes, definidas como citas médicas programadas a las que no se asiste, tienen un impacto negativo directo en la salud de los pacientes debido a la discontinuidad del tratamiento y a la atención retrasada. Además, estas

Identify applicable funding agency here. If none, delete this.

ausencias provocan un uso ineficiente de los recursos médicos en hospitales y clínicas [9]. La capacidad de predecir posibles inasistencias con anticipación permite diseñar e implementar intervenciones para reducir este riesgo, mejorando así la atención al paciente y optimizando la asignación de recursos clínicos.

Sincronizar la capacidad con la demanda es uno de los desafíos centrales en la gestión de operaciones en salud, especialmente considerando que ambas están sujetas a variabilidad e incertidumbre. El trabajo de [10] se centra en la programación de citas con el fin de maximizar la utilización de médicos, personal y equipamiento, evitando tiempos muertos.

B. Aprendizaje automático en la predicción de enfermedades

El uso de minería de datos y técnicas de aprendizaje automático ha revolucionado el ámbito sanitario, al permitir la identificación de patrones relevantes y relaciones complejas entre múltiples variables en grandes volúmenes de información clínica. Estas tecnologías aportan valor estratégico al facilitar decisiones basadas en datos, comparar resultados y anticipar eventos relevantes en salud.

En el sector salud, estas herramientas se aplican para recolectar, estructurar y analizar datos clínicos de manera sistemática, permitiendo identificar ineficiencias, promover buenas prácticas y mejorar la calidad de la atención. También contribuyen a diagnósticos más certeros, tratamientos eficaces y a la detección oportuna de enfermedades, facilitando la prevención a través del análisis de grandes bases de datos médicas.

A pesar de su relevancia, el proceso diagnóstico sigue enfrentando desafíos, pues depende en gran medida del juicio clínico y la experiencia del profesional. Factores como la sobrecarga de información, la multitarea y la falta de actualización continua pueden derivar en errores. En este contexto, los modelos predictivos y los sistemas inteligentes se presentan como una alternativa complementaria para mejorar la precisión diagnóstica. En paralelo, diversos estudios sobre programación de citas médicas han incorporado criterios de priorización, asignando atención preferente según el estado clínico de los pacientes u otros factores relevantes [11]–[14].

C. Aprendizaje automático en la predicción de asistencia

El estudio de [15] realizó encuestas en clínicas que habían implementado un sistema de programación de citas, revelando que los centros de salud más pequeños eran menos propensos a integrar completamente estos sistemas. A pesar de ello, estos centros registraban una tasa de asistencia de pacientes superior al 80%. El estudio sugiere la necesidad de una mayor implementación de programas de acceso avanzado y una adopción y asimilación más amplia de estos sistemas por parte de los pacientes.

El aprendizaje automático se utiliza con frecuencia en la programación de citas para identificar pacientes con mayor riesgo de inasistencia, permitiendo agendarlos en espacios sobreagendados o inmediatamente después de otros pacientes. Por ejemplo, el estudio de [16] propuso una función objetivo orientada a minimizar los tiempos de espera para grupos étnicos que experimentan tiempos de espera desproporcionadamente más largos, reduciendo dichos tiempos al considerar las diferencias absolutas entre los grupos.

Asignar probabilidades basadas en datos históricos mejora la precisión de las predicciones, como lo destacan estudios como [11] y [17], mejorando significativamente los sistemas de programación afectados por la inasistencia de pacientes.

III. METODOLOGÍA

Este estudio propone un sistema inteligente de programación de citas médicas que considera de forma conjunta la propensión de cada paciente a desarrollar enfermedades crónicas (Prdis) y su probabilidad de asistir a las citas agendadas (Prap).

Primero se construye un modelo de programación entero lineal que maximiza una función de utilidad social. Esta función considera el beneficio de atender a pacientes con alta probabilidad de enfermedad y asistencia, así como el costo de utilización de slots de atención médica en dos modalidades: Fixed-box (atención presencial) y Mobil-box (visitas domiciliarias).

Segundo, se utilizan algoritmos de machine learning (Árboles de Decisión, Redes Neuronales, SVM, Regresión Logística y Naive Bayes) para predecir Prdis y Prap a partir de datos históricos de pacientes. La propensión a enfermedad se calcula usando variables clínicas como presión arterial, colesterol, glicemia, actividad física, entre otras; mientras que la propensión de asistencia se basa en el historial de comparecencias a citas. El dataset es balanceado usando SMOTE y validado por conjuntos de entrenamiento, validación y prueba.

Tercero, las propensiones estimadas se integran al modelo de optimización, el cual asigna citas a pacientes según su perfil. Aquellos con alta Prap y Prdis son agendados en modalidad Fixed-box, mientras que los de baja asistencia pero alto riesgo son asignados a Mobil-box. El modelo es evaluado tanto en datos sintéticos como en un caso real (CESFAM de Portezuelo, Chile) utilizando métricas de cobertura, eficiencia y pruebas estadísticas (Shapiro-Wilk, Levene, t-test y Mann-Whitney). Los resultados obtenidos evidencian diferencias estadísticamente significativas entre el modelo propuesto y la asignación aleatoria en la Tabla I, mientras que la Figura 1 ilustra el impacto operativo del modelo, mostrando un mayor número promedio de pacientes agendados en ambas modalidades bajo el enfoque de optimización.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo propuesto mejora significativamente la eficiencia en la programación de citas médicas, en comparación con los métodos tradicionales de asignación aleatoria. Este enfoque basado en la estimación de la propensión a enfermar (Prdis) y a asistir a las citas (Prap) permite priorizar a los pacientes con mayores necesidades clínicas y con mayor probabilidad de presentarse a sus controles, mejorando así la utilización de los recursos disponibles en centros de salud.

TABLE I
STATISTICAL TESTS FOR COMPARING MEANS BETWEEN SCHEDULING MODELS FOR SYNTHETIC DATASET.

Group 1	Group 2	Normality Test Group 1 (p-value)	Normality Test Group 2 (p-value)	Variance Homogeneity	Applied Test	Test Statistic	Test p-value	Conclusion
Optimization Prap-fb	Random Prap-fb	0.000039	0.662798	0.658389	Mann-Whitney	110.000000	0.001293	Different
Optimization Prap-mb	Random Prap-mb	0.525362	0.986544	0.063764	Student's t	-9.332092	0.000000	Different
Optimization Prap-ns	Random Prap-ns	0.542582	0.751322	0.754786	Student's t	-6.040808	0.000010	Different
Optimization Prdis-fb	Random Prdis-fb	0.055464	0.605225	0.652148	Student's t	4.432107	0.000322	Different
Optimization Prdis-mb	Random Prdis-mb	0.000195	0.461780	0.400561	Mann-Whitney	90.000000	0.002827	Different
Optimization Prdis-ns	Random Prdis-ns	0.000608	0.706281	0.800553	Mann-Whitney	0.000000	0.000182	Different

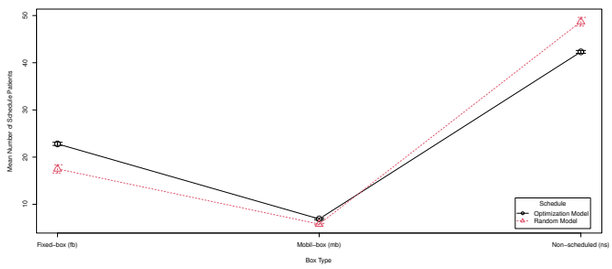


Fig. 1. Mean Number of Schedule Patients by Model for synthetic dataset.

Una de las principales fortalezas del modelo es su capacidad para reducir el número de inasistencias, lo que repercute directamente en una mejora en la continuidad del tratamiento y en una optimización del tiempo de los profesionales de la salud. Además, al incorporar una modalidad de atención domiciliaria (Mobil-box) para aquellos pacientes con bajo nivel de asistencia pero alto riesgo clínico, se logra extender la cobertura efectiva a grupos vulnerables, mitigando barreras geográficas y sociales.

El modelo también ha sido validado mediante pruebas estadísticas, que confirmaron diferencias significativas entre los resultados del modelo de optimización y los obtenidos por asignación aleatoria, tanto en propensión a enfermar como en propensión a asistir. Esto respalda la efectividad del sistema propuesto no solo en escenarios simulados, sino también en un caso real aplicado a datos de un centro de salud familiar en Chile.

AGRADECIMIENTOS

The preferred spelling of the word "acknowledgment" in America is without an "e" after the "g". Avoid the stilted expression "one of us (R. B.

REFERENCES

[1] J. Sun, Q. Lin, P. Zhao, Q. Zhang, K. Xu, H. Chen, C. J. Hu, M. Stuntz, H. Li, and Y. Liu, "Reducing waiting time and raising outpatient satisfaction in a chinese public tertiary general hospital-an interrupted time series study," *BMC Public Health*, vol. 17, pp. 1–11, 2017.

[2] J. P. Sepúlveda and C. Berroeta, "Reglas de decisión para la selección de sistemas de citas basadas en características del paciente y de la institución de salud," *Revista médica de Chile*, vol. 140, pp. 867–872, 2012.

[3] G. Lamé, O. Jouini, and J. S.-L. Cardinal, "Outpatient chemotherapy planning: A literature review with insights from a case study," *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, vol. 6, pp. 127–139, 2016.

[4] U. Mehdi and R. D. Toto, "Anemia, diabetes, and chronic kidney disease," *Diabetes care*, vol. 32, no. 7, pp. 1320–1326, 2009.

[5] World Health Organization, "Noncommunicable diseases." https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases, 2024. Accessed: 2024-06-24.

[6] OWiD, "Our world in data," 2024. Our World in Data (OWiD) es una publicación científica en línea que presenta datos empíricos sobre cómo han cambiado las condiciones de vida en todo el mundo. Los resultados se muestran a través de gráficos y mapas interactivos que muestran las tendencias de cambio por país y región.

[7] S. J. Duckett, "Private care and public waiting," *Australian Health Review*, vol. 29, pp. 87–93, 2005.

[8] M. Heshmat, K. Nakata, and A. Eltawil, "Solving the patient appointment scheduling problem in outpatient chemotherapy clinics using clustering and mathematical programming," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 124, pp. 347–358, 2018.

[9] F. Liu, A. Fredriksson, and S. Markidis, "A survey of hpc algorithms and frameworks for large-scale gradient-based nonlinear optimization," *The Journal of Supercomputing*, vol. 78, pp. 17513–17542, 2022.

[10] A. Kuiper, J. de Mast, and M. Mandjes, "The problem of appointment scheduling in outpatient clinics: A multiple case study of clinical practice," *Omega*, vol. 98, p. 102122, 2021.

[11] C. Zacharias and M. Pinedo, "Appointment scheduling with no-shows and overbooking," *Production and Operations Management*, vol. 23, pp. 788–801, 2014.

[12] M. Savelsbergh and K. Smilowitz, "Stratified patient appointment scheduling for mobile community-based chronic disease management programs," *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, vol. 6, pp. 65–78, 2016.

[13] D. Carreras-García, D. Delgado-Gómez, E. Baca-García, and A. Artés-Rodriguez, "A probabilistic patient scheduling model with time variable slots," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2020, 2020.

[14] D. Ruiz-Hernández, D. García-Heredia, D. Delgado-Gómez, and E. Baca-García, "A probabilistic patient scheduling model for reducing the number of no-shows," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 71, pp. 1102–1112, 2020.

[15] G. Paré, L. Raymond, A. Castonguay, A. G. Ouimet, and M.-C. Trudel, "Assimilation of medical appointment scheduling systems and their impact on the accessibility of primary care: Mixed methods study," *JMIR Med Inform*, vol. 9, p. e30485, 2021.

[16] M. Samorani, S. L. Harris, L. G. Blount, H. Lu, and M. A. Santoro, "Overbooked and overlooked: machine learning and racial bias in medical appointment scheduling," *Manufacturing Service Operations Management*, vol. 24, pp. 2825–2842, 2022.

[17] Y. Chen, Y.-H. Kuo, P. Fan, and H. Balasubramanian, "Appointment overbooking with different time slot structures," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 124, pp. 237–248, 2018.

Behavioral Nudges to Reduce Patient No-Shows and Increase Capacity Utilization in Medical Appointments

Marcelo Olivares
Faculty of Economics and Business
University of Chile
Santiago, Chile
molivares@fen.uchile.cl

Daniel Schwartz
Department of Industrial Engineering
University of Chile
Santiago, Chile
daschwar@dii.uchile.cl

***Abstract*—Missed medical appointments (no-shows) undermine the efficient use of healthcare resources. While previous research has focused on predicting no-shows or optimizing schedules, recent studies have shown the promise of behavioral interventions. We conducted a large-scale field experiment to test how behavioral nudges embedded in reminder calls affect patient and physician behavior. Our findings suggest that simple messagessuch as referencing a physicians agenda or accountability reminderscan significa...**

I. Introduction

Missed appointments represent a persistent problem across healthcare systems globally, contributing to increased operational costs, wasted resources, and longer wait times for patients. The issue is particularly acute in public and outpatient settings, where resource constraints and demand variability already challenge service delivery. The problem extends beyond simple patient absence: unfilled slots reduce capacity utilization and can create scheduling inefficiencies downstream.

Most traditional responses involve overbooking strategies, automated reminders, or machine-learning-based no-show predictions. While these approaches improve attendance to some extent, they may not adequately address the behavioral factors underlying patient decision-making. This motivates a broader investigation into behavioral nudgesinterventions grounded in behavioral science that aim to gently steer individuals toward desirable behaviors without restricting their freedom of choice.

II. Related Literature

The literature on no-shows spans several domains, including operations management, behavioral economics, and health policy. Early work (e.g., Alaeddini et al. 2011; Samorani and Laganga 2015) emphasizes statistical modeling to predict no-show risks, allowing clinics to adjust their schedules accordingly. These approaches typically rely on historical data and patient demographics but may overlook behavioral and contextual factors influencing attendance.

More recent studies have shifted toward designing and evaluating interventions. Senderey et al. (2020) show that guilt-based SMS messages significantly reduce no-shows and increase cancellation rates, particularly when patients are reminded of the consequences of their behavior. Liu et al. (2019) advocate for integrating behavioral insights into operational decisions, noting the value of field experimentation and randomized controlled trials (RCTs) in understanding real-world behavior.

Our work builds on this tradition by studying how simple, scalable messaging interventions can influence both patients and providers. We also distinguish our contribution by focusing on capacity utilization as a broader outcome, considering not just attendance but also cancellation timing, rebooking, and physician behavior.

III. Experimental Design

We collaborated with one of the largest private medical institutions in Latin America to design and implement a field experiment involving 117,051 outpatient appointments. These appointments spanned multiple specialtiessuch as dermatology, general medicine, ophthalmology, and traumaand were scheduled with a minimum lead time of three days (mean = 15.1 days; SD = 13.2).

Each patient received an automated IVR (interactive voice response) call three days before the scheduled appointment. The calls informed patients of the appointment details and allowed them to confirm or cancel via keypad input. Patients were randomized into one of the following three conditions:

- **Control:** A standard reminder containing only the appointment details (physician name, date, time, location).
- **Justification Aversion:** The same reminder plus a message stating that patients who miss appointments may be contacted to explain their absence.
- **Agenda Set:** The standard reminder augmented with a statement that the patient is included in the physicians agenda.

This design draws on behavioral mechanisms such as accountability and identity salience. The study protocol was preregistered on `aspredicted.org` to ensure methodological transparency and avoid data-driven hypotheses.

IV. Outcomes and Measures

We developed a classification of appointment outcomes to assess utilization more comprehensively:

1) **Direct Attendance:** The patient attends as scheduled.
2) **Substitute Attendance:** The patient cancels in time and another patient is scheduled.
3) **Unutilized Slot:** The patient cancels too late or does not show up.
4) **Physician Blocked:** The slot is marked as unavailable by the physician, often due to perceived uncertainty.

These categories allow us to evaluate not only patient compliance but also system-level effects. For instance, if a nudge leads to earlier cancellations, it increases the chance of substitution. Conversely, uncertainty may prompt physicians to block slots preemptively, reducing net utilization.

V. Preliminary Results

Initial analysis shows that both the Justification Aversion and Agenda Set treatments reduce no-shows compared to the control group. The Justification Aversion condition leads to more timely cancellations, which increases the probability that the slot is rebooked. The Agenda Set condition appears to reduce physician blocking, possibly by increasing the perceived reliability of the patient's attendance.

Importantly, the interventions are low-cost, scalable, and suitable for integration into existing communication systems. The gains in effective utilization range from 37% depending on the specialty, suggesting meaningful improvements in system efficiency.

VI. Conclusion

This study demonstrates that behavioral nudges can play a critical role in improving healthcare operations. Beyond reducing no-shows, such interventions influence cancellation timing and physician scheduling behavior, thus improving overall capacity utilization. Our findings advocate for the inclusion of behavioral tools in appointment management systems, particularly in resource-constrained healthcare environments. Future work will investigate personalization strategies and long-term adoption.

References

[1] Alaeddini, A., et al. (2011). A probabilistic model for predicting the likelihood of no-show appointments. *Healthcare Management Science*.

[2] Samorani, M. and Laganga, L. R. (2015). Scheduling patients with uncertain no-show probabilities. *Health Care Management Science*.

[3] Senderey, A. B., et al. (2020). Please call me back: The effect of emotional messages on reducing no-shows. *Management Science*.

[4] Liu, N., et al. (2019). Behavioral operations in health care: A review and research agenda. *Production and Operations Management*.

Session N°5 – Track N°4

Multi-objective Optimization

Chair: Gómez-Lagos, J. *(Universidad Católica del Maule)*
Place: G6-056
Time: 08:30 – 09:45

Optimización Multiobjetivo de Ángulos de Haz con NSGA-II

Time: 08:30 – 08:45
Authors:

- Ojeda-Ortega, N. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Moyano, M. *(Universidad Católica del Norte)*
- Hernández, C. *(Universidad Nacional Autónoma de México)*
- González-Gallardo, S. *(Universidad de Málaga)*
- Cabrera-Guerrero, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Bi-objective Planning for Forest Harvesting

Time: 08:50 – 09:05
Author: Viana-Céspedes, V. *(Universidad de la República)*

A Robust Sensitivity Analysis for a Multi-Objective Local Search for Beam Angle Optimisation in IMRT

Time: 09:10 – 09:25
Authors:

- Muñoz-Bustos, S. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Moyano, M. *(Universidad Católica del Norte)*
- Cabrera-Guerrero, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Propuesta de una Métrica basada en el Modelo Slacks-Based Measure para Evaluar la Forma de un Conjuntos de Soluciones no Dominadas en Optimización Multi-objetivo

Time: 09:30 – 09:45
Authors:

- Gómez-Lagos, J. *(Universidad Católica del Maule)*
- González-Araya, M. *(Universidad de Talca)*
- Angulo-Meza, L. *(Universidade Federal Fluminense)*
- Acosta-Espejo, L. *(Universidad Técnica Federico Santa Maria)*
- Reyes-Reyes, N. *(Universidad Católica del Maule)*

Optimización Multiobjetivo de Ángulos de Haz con NSGA-II

1st Nicolle Ojeda-Ortega
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
nicole.ojeda@pucv.cl

2nd Mauricio Moyano
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
mauricio.moyano@ucn.cl

3th Carlos Hernández
Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México
carlos.hernandez@iimas.unam.mx

4rd Sandra González-Gallardo
Departamento de economía aplicada (Matemáticas)
Universidad de Málaga
Málaga, España
sandragg@uma.es

5th Guillermo Cabrera-Guerrero
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
guillermo.cabrera@pucv.cl

***Abstract*—La selección de ángulos de haz en radioterapia de intensidad modulada es un problema computacionalmente complejo y multiobjetivo, donde se busca equilibrar la cobertura tumoral y la protección de órganos en riesgo. Este trabajo propone un enfoque evolutivo basado en NSGA-II adaptado al dominio discreto de la optimización de ángulos de haz. Se analizan cuatro operadores de cruce (SBX, PMX, RUX y OX1) y dos estrategias de mutación (reemplazo aleatorio y adición/sustracción). Los resultados preliminares muestran que la elección de operadores influye significativamente en la calidad del frente de Pareto obtenido, destacando la combinación RUX-R como la más efectiva en términos de hipervolumen y convergencia.**

***Index Terms*—Beam angle optimisation, Multiobjective optimisation, Evolutionary algorithm, NSGA-II, Intensity Modulated Radiation Therapy.**

I. Introducción

La radioterapia de intensidad modulada (IMRT) tiene como objetivo maximizar la dosis aplicada al tumor mientras se minimiza la irradiación de los tejidos sanos [1]. En la planificación de IMRT, la calidad del plan depende no solo de la modulación de la intensidad del haz, sino también de la configuración geométrica desde la cual se entrega la radiación. Este problema, conocido como Beam Angle Optimization (BAO), es computacionalmente desafiante debido a su espacio de búsqueda combinatorio y naturaleza multiobjetivo. El objetivo es encontrar subconjuntos de ángulos desde los cuales irradiar al paciente que maximicen la cobertura del tumor (PTV) mientras se minimiza la dosis a estructuras sanas (OARs).

Este proyecto fue financiado por ANID Fondecyt Regular folio 1241710, y ANID beca doctorado nacional folio 21232361

Aunque existen múltiples estudios centrados en la optimización de angulos, la literatura aún limitada en el ámbito multiobjetivo. En este trabajo se explora un enfoque evolutivo usando NSGA-II, integrando operadores de cruce y mutación adaptadas al dominio de ángulos discretos con el objetivo de aproximarse eficientemente al frente de Pareto en IMRT.

II. Formulación del problema MO-BAO

Sea K el conjunto discreto de ángulos de haz candidatos (por ejemplo, $\{0°, 5°, \ldots, 355°\}$) y N el número de haces a seleccionar. Denotamos $P_N(K) = \{A \subset K : |A| = N\}$ al conjunto de todas las configuraciones posibles de N ángulos distintos. Cada configuración $A \in P_N(K)$ determina un subconjunto de haces activos, sobre los cuales se resolverá el problema de optimización de fluencia (FMO) asociado.

Para una configuración fija A, en esta investigación el problema de optimización multiobjetivo de fluencia (MO-FMO) busca minimizar simultáneamente las dosis en los OARs, representadas mediante la métrica gEUD, mientras se garantiza que la dosis al PTV cumpla con una cota mínima. La función gEUD [2] para una región r compuesta por m_r vóxeles se define como:

$$\mathrm{gEUD}_r(x) = \left(\frac{1}{m_r} \sum_{j=1}^{m_r} [d_{rj}(x)]^{a_r} \right)^{1/a_r},$$

donde $d_{rj}(x)$ es la dosis en el vóxel j de la región r inducida por el mapa de fluencia x, y a_r es un parámetro que modela el comportamiento de riesgo del tejido: $a_r > 1$ para OARs (particularmente alto para órganos seriales) y $a_r < 0$ para tumores.

La dosis en cada vóxel j se calcula a partir de una matriz de deposición de dosis A^r como:

$$d_{rj}(x) = \sum_{i=1}^{n} A^r_{ji} x_i, \quad \forall j = 1, \ldots, m_r,$$

donde x_i representa la fluencia del haz o subhaz i, y n es el número total de subhazs activos en la configuración.

El problema de optimización de ángulos de haz (MO-BAO) [3], consiste entonces en seleccionar la mejor configuración $A \in P_N(K)$ que permita, a través del MO-FMO asociado, obtener un conjunto de soluciones no dominadas que optimicen la protección de los OARs bajo la condición de cobertura tumoral. Se plantea formalmente como:

$$\min_{x \in X(A)} \Big(\mathrm{gEUD}_{O_1}(x), \ldots, \mathrm{gEUD}_{O_Q}(x) \Big)$$

$$s.t.\ \mathrm{gEUD}_T(x) \geq t$$

T representa el PTV, y t es el valor mínimo aceptable de gEUD para el PTV. El conjunto factible $X(A)$ incluye todas las configuraciones de fluencia no negativas compatibles con la geometría y los haces definidos por A.

Debido al amplio espacio de búsqueda de configuraciones, en este estudio se utiliza el algoritmo NSGA-II para explorar de manera eficiente las posibles soluciones.

III. Algoritmo NSGA-II

Non dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) [4] es un algoritmo genético multiobjetivo ampliamente utilizado, caracterizado por su eficiencia en procesar poblaciones grandes y mantener diversidad entre soluciones. Opera generacionalmente: a cada iteración, clasifica la población actual en niveles de dominancia de Pareto (frentes). El primer frente contiene las soluciones no dominadas; el segundo contiene las no dominadas excluyendo las del primero, y así sucesivamente. Adicionalmente, calcula *crowding distance* para cada solución, esta mide la densidad de vecinos en el espacio objetivo y favorece soluciones en regiones menos pobladas.

En cada generación se aplica selección torneo para elegir padres, los cuales generan descendencia mediante operadores de cruce y mutación. Luego se combinan padres e hijos en una población temporal que se reordena en frentes de Pareto. Las soluciones con mejor orden Pareto y mayor *crowding distance* son seleccionadas para formar la nueva población fija de tamaño N. Este proceso iterativo continua hasta alcanzar un criterio de parada.

La estructura de NSGA-II permite incorporar distintos operadores específicos del problema. Comúnmente utiliza cruza de múltiples puntos(o SBX) y mutación real, pero en nuestro caso adaptamos los operadores para permutaciones de ángulos discretos. En nuestra propuesta, cada individuo representa un conjunto de N ángulos discretos, y el proceso evolutivo sigue el esquema general de NSGA-II para promover simultáneamente convergencia y diversidad en las soluciones.

IV. Codificación del Problema

En este trabajo, se adapta la representación de soluciones en NSGA-II al caso discreto de ángulos en IMRT. Cada individuo es un conjunto de cinco ángulos únicos seleccionados de un conjunto K con incrementos de 5 grados (total de 72 ángulos posibles).

El problema de BAO se define como la selección de un subconjunto de N ángulos distintos desde un conjunto discreto de posibles direcciones de haz. En nuestro caso, consideramos $N = 5$ ángulos, seleccionados del conjunto $\mathcal{K} = \{0°, 5°, 10°, \ldots, 355°\}$, lo que da lugar a 72 ángulos posibles separados uniformemente por 5 grados. Cada individuo en la población del algoritmo evolutivo representa una configuración candidata de ángulos de haz.

Durante el proceso evolutivo, los operadores de cruce y mutación actúan sobre estos individuos, asegurando que la validez de las soluciones se mantenga. En los casos en que se produzca una violación de estas condiciones durante la evolución, se aplica un mecanismo de reparación que ajusta los valores conflictivos al ángulo más cercano disponible dentro del conjunto permitido.

A. Operadores de Cruce

Se integran cuatro operadores de cruce utilizados en este trabajo: Simulated Binary Crossover (SBX), Partially Matched Crossover (PMX) y Random Union Crossover (RUX), One Point Crossover(OX1).

1) Cruce binario (SBX): La cruza binaria simulada (SBX) [5] imita un cruce de un punto en codificación continua aplicado al dominio discreto de ángulos. Dados dos padres $x^{(1)}, x^{(2)}$ con valores enteros representando ángulos (p. ej., en grados), SBX genera dos hijos interpolando entre ellos mediante una distribución centrada en los padres. Se define un parámetro η_c (índice de distribución) que controla la dispersión de los descendientes respecto a los padres.

2) Cruce parcialmente emparejado (PMX): PMX es un operador clásico para permutaciones [6]. Se selecciona un segmento de posiciones en la representación de ambos padres, se intercambian esos segmentos y luego se resuelven las colisiones mediante un mapeo de valores entre ellos. PMX garantiza que los hijos mantengan ángulos únicos.

3) Cruce por unión aleatoria (RUX): RUX construye la unión de los conjuntos de ángulos de ambos padres y luego selecciona aleatoriamente N ángulos de esta unión para formar el hijo.

4) Cruce de un punto (OX1): Este operador selecciona aleatoriamente una posición de corte $c \in \{1, \ldots, N-1\}$ y realiza un intercambio de las subsecuencias posteriores al punto de corte entre los dos padres [7].

B. Operadores de Mutación

A continuación, se describen dos estrategias de mutación adaptadas al dominio del BAO.

1) Mutación de adición/sustracción (A/S): Este operador computacional elige aleatoriamente un angulo de la configuración y le suma o le resta $5°$, verificando que el resultado permanezca en el rango de $0°$ a $355°$ y corrigiendo si es necesario.

2) Mutación de reemplazo aleatorio (R): Consiste en seleccionar un angulo aleatoriamente y reemplazarlo por otro angulo valido que no este presente en la solución.

C. Inicialización de la población

Para construir la población inicial, se emplea una estrategia inspirada en el algoritmo iCycle [8], la cual combina selección aleatoria con criterios dosimétricos para guiar la construcción de cada individuo. El procedimiento comienza seleccionando aleatoriamente el primer ángulo. Luego, iterativamente, se agregan nuevos ángulos a la configuración parcial. En cada paso, para cada ángulo candidato a, se evalúa la calidad dosimétrica de la configuración mediante una función de puntuación definida como:

$$\text{Score}(A) = \frac{\sum_{r \in \text{OARs}} \text{gEUD}_r(A)}{\text{gEUD}_{\text{PTV}}(A)}$$

donde A representa una configuración parcial o completa de ángulos de haz, $\text{gEUD}_r(A)$ es el valor del gEUD (generalized Equivalent Uniform Dose) para el órgano en riesgo r, y $\text{gEUD}_{\text{PTV}}(A)$ es el gEUD calculado para el volumen blanco (PTV).

En cada iteración se selecciona el ángulo a^* que, al ser añadido al conjunto actual, minimiza el score global.

V. Resultados Preliminares

La validación del algoritmo se realizó mediante experimentos computacionales en la plataforma PlatEMO [9], implementando el problema de optimización de ángulos de haz (BAO) con distintos operadores de cruce y mutación dentro del marco de NSGA-II. Se utilizaron poblaciones de 20 individuos durante 40 generaciones. Se evaluó todas las combinaciones de los operadores y se analizaron los resultados en función de métricas de calidad del frente de Pareto, tales como el número de soluciones no dominadas, hipervolumen (HV), Inverted Generational Distance (IGD).

Los resultados revelaron que la combinación RUX con mutación por reemplazo fue la más robusta, al alcanzar el mayor hipervolumen promedio y el menor IGD, lo que sugiere una mejor cobertura del espacio objetivo y mayor proximidad al frente de referencia. De manera general, las configuraciones con mutación por reemplazo superaron a sus contrapartes con mutación por adición/sustracción. Por ejemplo, tanto RUX y SBX con reemplazo obtuvieron mejores resultados en todas las métricas evaluadas en comparación con sus variantes con adición y sustracción.

PMX fue el operador con peor desempeño global, especialmente bajo la mutación adición y sustracción. En conjunto, los resultados preliminares subrayan la importancia de seleccionar adecuadamente tanto el operador de cruce como la estrategia de mutación.

VI. Conclusiones y Trabajo Futuro

Este estudio presentó una evaluación preliminar del impacto de distintos operadores de cruce y mutación en un NSGA-II adaptado al problema MO-BAO en IMRT. Se integraron tanto operadores clásicos como otros diseñados para dominios discretos, combinados con estrategias de mutación por reemplazo y adición/sustracción. Los resultados obtenidos, aunque preliminares, muestran que la elección de operadores influye significativamente en la calidad del frente de Pareto.

Estos hallazgos constituyen una base sólida para el desarrollo y mejora del algoritmo, abriendo paso a futuras investigaciones orientadas a incorporar mecanismos de búsqueda local híbridos que permitan refinar soluciones prometedoras, así como a realizar un análisis más exhaustivo del desempeño de los operadores. En particular, se propone comparar estas configuraciones con algoritmos multiobjetivo del estado del arte, con el fin de validar su eficacia y generalidad en distintos escenarios.

Referencias

[1] M. Ehrgott, Ç. Güler, H. W. Hamacher, and L. Shao, "Mathematical optimization in intensity modulated radiation therapy," *Annals of Operations Research*, vol. 175, no. 1, pp. 309–365, 2010.

[2] A. Niemierko, "Reporting and analyzing dose distributions: A concept of equivalent uniform dose," *Medical Physics*, vol. 24, no. 1, pp. 103–110, 1997. [Online]. Available: https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1118/1.598063

[3] G. Cabrera G, M. Ehrgott, A. J. Mason, and A. Raith, "A matheuristic approach to solve the multiobjective beam angle optimization problem in intensity-modulated radiation therapy," *INTERNATIONAL TRANSACTIONS IN OPERATIONAL RESEARCH*, vol. 25, no. 1, SI, pp. 243–268, JAN 2018, 31st Euro Mini Conference on Improving Healthcare - New Challenges, New Approaches, Coimbra, PORTUGAL, MAR 30-APR 01, 2015.

[4] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii," *Trans. Evol. Comp*, vol. 6, no. 2, p. 182–197, Apr. 2002. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/4235.996017

[5] K. Deb and R. B. Agrawal, "Simulated binary crossover for continuous search space," *Complex Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 115–148, 1995.

[6] D. E. Goldberg and R. Lingle, "Alleles, loci, and the traveling salesman problem," in *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*. Lawrence Erlbaum Associates, 1985, pp. 154–159.

[7] D. A. Umbarkar and P. Sheth, "Crossover operators in genetic algorithms: A review," *ICTACT Journal on Soft Computing (Volume: 6 , Issue: 1)*, vol. 6, 10 2015.

[8] S. Breedveld, P. Storchi, P. Voet, and B. Heijmen, "icycle: Integrated, multicriterial beam angle, and profile optimization for generation of coplanar and noncoplanar imrt plans," *Medical physics*, vol. 39, pp. 951–63, 02 2012.

[9] Y. Tian, R. Cheng, X. Zhang, and Y. Jin, "PlatEMO: A MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 73–87, 2017.

Bi-objective planning for forest harvesting

Case study from Uruguay

Víctor Viana Céspedes
Ingeniería Forestal, CENUR Noreste
Universidad de la República
Tacuarembo, Uruguay
victor.viana@noreste.udelar.edu.uy

***Abstract*—The present study focuses on the resolution of the multi-objective optimisation problem of forest harvesting machinery allocation, with consideration given to two primary objectives: minimising operating costs and minimising the amount of machinery utilised. In order to address this issue, a mathematical model employing bi-objective optimisation techniques is hereby proposed. The model's primary function is to identify the allocation of machinery that is capable of satisfying the two objectives previously mentioned. The efficacy of the proposed model was tested and validated using real data from the Uruguayan forestry sector. The findings indicate that the proposed model successfully identifies optimal solutions, leading to substantial reductions in operating costs and the number of forestry machinery units required.**

***Index Terms*—optimisation, mathematical programming, genetic algorithm**

I. Introduction

Forest harvesting is an intricate process, influenced by numerous economic, logistical, and environmental factors[1]. The efficient allocation of harvesting machinery is a critical challenge for companies in the sector, as it directly impacts profitability and the sustainability of practices[2]. Conventionally, the focus of harvest planning has been on single objectives, such as minimising costs, with other equally relevant metrics being given insufficient consideration[3]. This one-dimensional approach has the potential to result in suboptimal solutions. While these solutions may reduce a specific cost, they can generate inefficiencies in resource utilisation or compromise long-term operational capacity. The intricacies inherent in forestry operations are further compounded by the variability in terrain conditions, tree types, the distance to processing centres, and the availability of equipment[4].

In this context, multi-objective optimisation emerges as a robust methodology for addressing the inherently conflicting nature of objectives in forest planning. Specifically, in the context of the allocation of harvesting machinery, two primary objectives emerge that exhibit opposing trends: the minimisation of total operating costs and the minimisation of the number of machines utilised. A reduction in the number of machines has the potential to decrease both fixed and maintenance costs. However, this may be counterbalanced by an increase in variable costs or downtime if the capacity is inadequate. Conversely, the implementation of additional equipment can guarantee uninterrupted operation; however, this is accompanied by an escalation in fixed expenses. The resolution of this duality necessitates an analytical framework capable of exploring the Pareto set of solutions, where it is not possible to improve one objective without deteriorating the other[3].

II. Mathematical formulation

The model operates on the following discrete sets, which define the key entities of the system:

- I: forest harvesting locations
- M: forest harvesting machines (harvesters)
- H: types of forest harvesting operations
- S: customers who require the harvested material
- T: planning horizon (days)

The parameters that quantify the technical relationships, physical constraints and economic aspects of the system are as follows:

- p_{mi}: productivity of harvester m at harvesting site i; $m \in M, i \in I$.
- v_i: volume of wood at harvesting site i; $i \in I$
- k_i: productivity coefficient of harvesting site i; $i \in I$
- $t_{mi} = \frac{v_i}{p_{mi} \cdot k_i}$: harvesting time (days) of machine m at location i; $m \in M, i \in I$.
- r_{mij}: transfer time (days) of harvester m from location i to location j; $m \in M, i, j \in I$
- f_{mh} = 1 if harvester m can perform harvest type h, 0 otherwise; $m \in M, h \in H$.
- g_{hi} = 1 if harvest type h is performed at location i, 0 otherwise; $h \in H, i \in I$.
- w_{mh}: maximum harvest volume allowed for machine m with harvest type h; $m \in M, h \in H$
- l_i latest date on which harvest can take place at location i; $iinI$
- c_{ih}: cost of harvesting and loading operations for location i, harvest type h;$h \in H, i \in I$.
- ct cost per day of transport from any location to another.
- o_{sh}: volume to be delivered to customers with harvest type h; $s \in S, h \in H$.
- oc_{si}: cost of transporting the harvest from the location to deliver to customers; $s \in S, i \in I$.
- ol_s: latest date for delivering what was requested by customers; $s \in S$.

The following variables are to be considered in order to comprehend the operational and temporal decisions:

- $y_{mi} \in \{0,1\}$: 1 if harvester m is used at harvest location i; $m \in M, i \in I$.
- $s_{mi} \in T$: start date of harvesting at location i by machine m; $m \in M, i \in I$.
- $x_{mij} \in \{0,1\}$: 1 if harvester m is moved to harvesting location j after operating at location i; $m \in M, i, j \in I$.
- $q_{shmi} \in \mathbb{R}^+$: volume harvested of type h at location i by harvester m to satisfy customer s; $s \in S, h \in H, m \in M, i \in I$

The model pursues two conflicting objectives through bi-objective optimisation, as can be seen in expressions (1) and (2):

$$\min Z_1 = \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} y_{mi} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} (c_{ih} + oc_{si}) \cdot q_{shmi} \\ & + \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} ct \cdot r_{mij} \cdot x_{mij} \end{aligned} \tag{2}$$

The constraints of the problem are listed below:

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in I} q_{shmi} = o_{sh} \quad \forall s \in S, h \in H \tag{3}$$

$$s_{mi} + t_{mi} \leq ol_s \quad \forall s \in S, m \in M, i \in I \tag{4}$$

$$s_{mi} + t_{mi} \leq l_i \quad \forall m \in M, i \in I \tag{5}$$

$$\begin{aligned} & q_{shmi} \leq v_i \cdot f_{mh} \cdot g_{hi} \cdot y_{mi} \\ & \forall s \in S, h \in H, m \in M, i \in I \end{aligned} \tag{6}$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} q_{shmi} \leq w_{mh} \quad \forall m \in M, h \in H \tag{7}$$

$$y_{mi} \leq 1 \quad \forall m \in M, i \in I \tag{8}$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{m \in M} q_{shmi} \leq v_i \quad \forall i \in I \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in I, j \neq i} x_{mji} = y_{mi} \quad \forall m \in M, i \in I \\ \sum_{j \in I, j \neq i} x_{mij} = y_{mi} \quad \forall m \in M, i \in I \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} s_{mj} \geq s_{mi} + t_{mi} + r_{mij} - bigM(1 - x_{mij}) \\ \forall m \in M, i, j \in I, i \neq j \end{aligned} \tag{11}$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} q_{shmi} \leq bigM \cdot y_{mi} \quad \forall m \in M, i \in I \tag{12}$$

$$\begin{aligned} y_{mi} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, i \in I \\ x_{mij} \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, i, j \in I \\ s_{mi} \geq 0 \quad \forall m \in M, i \in I \\ q_{shmi} \geq 0 \quad \forall s \in S, h \in H, m \in M, i \in I \end{aligned} \tag{13}$$

Restrictions (3) ensure that customer demand is met and (4) that customer deadlines are met. Restrictions (5) ensure that harvest deadlines are met at each location. In expression (6), the compatibility between the type of harvest used and the location is checked. Restriction (7) also checks that the maximum harvest capacity per machine and type is not exceeded at each location. Restriction (8) establishes that a machine operates at most once at each location. Restriction (9) establishes that the available volume limit per location must be respected. Constraints (10), (11), (12) and (13) ensure the conservation of flow in machine transfers, the temporal sequence of operations, the activation of harvest variables, and the constraints of non-negativity and domain. The following section will present two of the most popular techniques for solving these multi-objective problems: the ε-constraint and NSGA-II algorithms.

III. Resolution strategies

In the context of seeking a set of solutions that are optimal in multiple dimensions or objectives, this paper proposes a methodology for identifying a set of solutions that represent a compromise between the various objectives of the problem. The ε-constraint algorithm is characterised by the selection of an objective function as the primary function to be minimised, with the other objective function being restricted to specific values, denoted by ε. This process is iterated by varying the values of ε to identify various solutions and consequently obtain a set of Pareto (optimal) solutions. Subsequently, a filtration technique is implemented to select the non-dominated solutions, i.e., those that cannot be improved in one of the objectives without worsening in another.

NSGA-II (Non-Dominating Genetic Algorithm) is an algorithm implemented based on [5] that follows the general outline of a genetic algorithm with modified crossover and selection. In NSGA-II, individuals are first selected frontally. When doing this, a situation will arise in which a front needs to be divided because not all individuals can survive. At this division front, solutions are selected based on the agglomeration distance.

To encode the solution, take

- a vector for harvest schedule (14)

$$\begin{aligned} [\text{start day location}_0, \text{start day location}_1, ..., \text{start day location}_{I-1}] \\ \text{Values: 0 = do not harvest,} \\ \text{1 to T = harvest start day} \end{aligned} \tag{14}$$

- a vector for machine assignment (15)

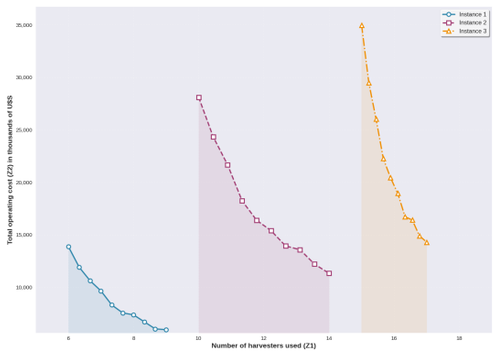


Fig. 1. Pareto fronts for the three instances where ε-constraints algorithm is used.

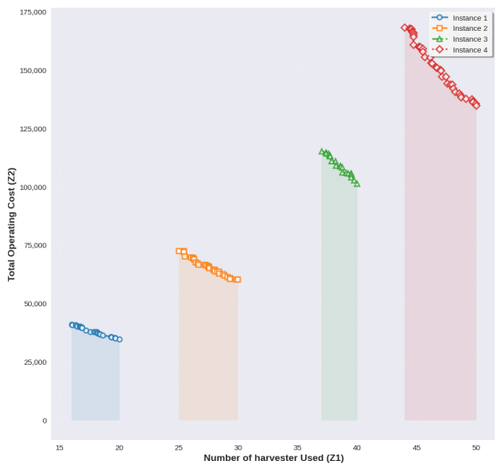


Fig. 2. Pareto fronts for the four instances where NGSA-II is used.

$$[\text{harvest location}_0, \text{harvest location}_1, ..., \text{harvest location}_{I-1}]$$
Values: -1 = not assigned,
0 to M-1 = harvest index
(15)

This encoding is more suitable than binary encoding due to the size of the problem instances, which can be excessively large. The encoding does not contain any order, and the exchange of genes on the chromosome does not change the fitness of the solution.

IV. Experimental evaluation

To perform this evaluation, the code was written in Python and the Pyomo library[6] was used, with the open source CBC solver[7], on a computer running Debian Linux 12, with a Core i5 processor and 24 GB of RAM. NSGA-II is developed using Python 3.10.6 and jMetalPy (a library for metaheuristic algorithms)[8].

Figure 1 shows the results of applying the e-constraints algorithm to three different instances of three forest harvesting operators in Uruguay. Figure 2 shows the Pareto fronts of four instances formed by four different groups of forest harvesting operators. NSGA-II provides well-distributed and diverse fronts; larger instances show greater complexity in the trade-off, as can be seen in Figure 3.

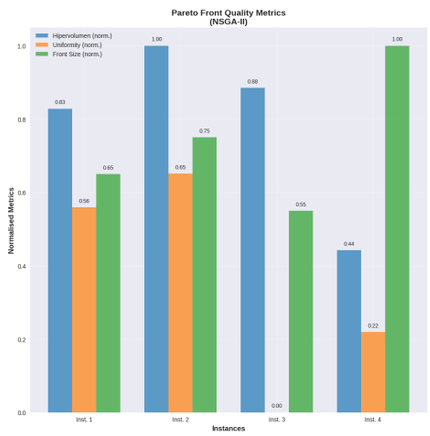


Fig. 3. NGSA-II quality metrics

V. Conclusions

The work presented shows a valid methodology for the efficient allocation of forest harvesters, considering the multiple objectives of minimising the number of machines used and minimising the total cost of harvesting operations. Acceptable results were achieved for both the exact method and the heuristic method for small and medium-sized instances. The exact method, using free software, yielded good results for the same type of instances. Decision-makers now have two valid tools for this realistic forest harvesting problem.

References

[1] Demir, M. (2012). Interactions of Forest Road, Forest Harvesting and Forest Ecosystems. In Forest Ecosystems - More than Just Trees. InTech. https://doi.org/10.5772/30121

[2] Hernandez, M., Gómez, T., Molina, J., León, M. A., & Caballero, R. (2014). Efficiency in forest management: A multiobjective harvest scheduling model. Journal of Forest Economics, 20(3), 236-251.

[3] López, J. (2013). Optimización multi-objetivo (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

[4] Lejeune, M. A., & Kettunen, J. (2017). Managing reliability and stability risks in forest harvesting. Manufacturing & Service Operations Management, 19(4), 620-638.

[5] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182-197.

[6] Hart, W. E., Laird, C. D., Watson, J. P., Woodruff, D. L., Hackebeil, G. A., Nicholson, B. L., & Siirola, J. D. (2017). Pyomo-optimization modeling in python (Vol. 67, p. 277). Berlin: Springer.

[7] Forrest, J., & Lougee-Heimer, R. (2005). CBC user guide. In Emerging theory, methods, and applications (pp. 257-277). INFORMS.

[8] Benítez-Hidalgo, A., Nebro, A. J., García-Nieto, J., Oregi, I., Del Ser, J. (2019). jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics. Swarm and Evolutionary Computation, 51, 100598.

A Robust Sensitivity Analysis for a Multi-Objective Local Search for Beam Angle Optimisation in IMRT

1st Sebastian Muñoz-Bustos
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
sebastian.munoz.b@mail.pucv.cl

2nd Mauricio Moyano
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
mauricio.moyano@ucn.cl

3rd Guillermo Cabrera-Guerrero
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
guillermo.cabrera@pucv.cl

***Abstract*—Este trabajo continúa el previamente propuesto sobre el algoritmo de búsqueda local para el problema de selección de ángulos de haces de radiación en Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT), haciendo un acercamiento multiobjetivo. Se realiza un análisis de sensibilidad respecto a las soluciones. Representamos cada escenario con movimientos del isocentro de 5mm para el cálculo de las dosis. Finalmente, se utilizó un frente de Pareto multiobjetivo para determinar el conjunto de soluciones, sobre el cual se realiza un análisis de degradación al considerar soluciones robustas.**

***Index Terms*—Beam Angle Optimization, IMRT, Robust Optimization, Multi-objective ,Local Search**

I. Introducción

Dentro de IMRT, existe el problema de Beam Angle Optimization (BAO), donde se busca seleccionar un subconjunto de ángulos de radiación que optimicen la calidad del tratamiento, maximizando la radiación al tumor y minimizando la recibida por órganos colindantes.

Este problema ha sido modelado de forma exacta en trabajos previos [1], donde se propuso un algoritmo de búsqueda local que explora un vecindario de configuraciones de ángulos para seleccionar aquellas soluciones consideradas óptimas en ambos objetivos (en el caso del cáncer de próstata, la dosis mínima al recto y la vejiga).

Dado que los planes de tratamiento están sujetos a incertidumbres —como cambios anatómicos en el paciente o errores de configuración del equipo— se propone la optimización robusta del problema BAO. Para esto, se consideran cuatro escenarios que modelan desplazamientos del isocentro de ± 5mm en los ejes x e y.

II. Estrategia de Búsqueda Local

Se mantiene la estructura de vecindario del trabajo anterior [1], donde nuevas soluciones son generadas al perturbar uno o más ángulos dentro de una tolerancia de $\pm 5^{\circ}$. Los vecinos candidatos se optimizan con base en el escenario original y se evalúan en todos los escenarios.

Un archivo de Pareto almacena soluciones no dominadas. Cuando se encuentra una nueva solución, se compara mediante dominancia robusta estricta, y el archivo se actualiza en consecuencia.

Posteriormente, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar cuánto se degradan las soluciones óptimas al ser evaluadas en todos los escenarios. Esto permite estimar la viabilidad de utilizar soluciones robustas en la práctica clínica.

III. Resultados y Discusión

Los resultados preliminares muestran que el algoritmo de búsqueda local, junto con el análisis de robustez, permite obtener aproximaciones cercanas al frente de Pareto eficiente. El uso del análisis robusto posterior disminuye significativamente la carga computacional, al tiempo que mejora el manejo de la degradación en los escenarios.

Además, la reutilización de los movimientos de vecindario previamente definidos permite una integración fluida en el marco robusto sin aumentar significativamente el costo computacional.

IV. Conclusión

Este estudio explora el uso de algoritmos de búsqueda local robusta multiobjetivo para abordar el problema de BAO bajo incertidumbre. Como trabajo futuro se propone la inclusión de criterios clínicos adicionales para hacer las soluciones más relevantes desde una perspectiva médica. También se plantea la evaluación de otros enfoques de optimización robusta multiobjetivo para comparar sus ventajas y desventajas en el contexto del problema BAO.

REFERENCES

[1] G. Cabrera-Guerrero, A. Mason, A. Raith, and M. Ehrgott, "Pareto local search algorithms for the multi-objective beam angle optimisation problem," *Journal of Heuristics*, vol. 24, no. 1, pp. 205–238, 2018.

Propuesta de una Métrica basada en el modelo Slacks-Based Measure Para Evaluar la Forma de un Conjuntos de Soluciones No Dominadas en Optimización Multi-objetivo

Javier E. Gómez Lagos
Departamento de Computación e Industrias
Universidad Católica del Maule
Talca, Chile
jgomezl@ucm.cl

Marcela C. González Araya
Departamento de Ingeniería Industeial
Universidad de Talca
Curicó, Chile
mgonzalez@utalca.cl

Lidia Angulo-Meza
Production Engineering Department,
Universidade Federal Fluminense
Niterói, Brasil
lidiaangulomeza@id.uff.br.

Luis G. Acosta Espejo
Departamento de Ingeniería Comercial
Universidad Técnica Federico Santa Maria.
Vitacura, Santiago, Chile
luis.acosta@usm.cl

Nicolas A. Reyes-Reyes
Departamento de Computación e Industrias
Universidad Católica del Maule
Talca, Chile
nreyes@ucm.cl

***Abstract*— La optimización multiobjetivo es un área relevante en la investigación de operaciones debido a la necesidad de tomar decisiones considerando múltiples objetivos en conflicto, buscándose encontrar un conjunto de soluciones no dominadas. Dado esto, varios métodos han sido propuestos para obtener este conjunto de soluciones. Por lo tanto, se requieren métricas de desempeño para evaluar la calidad del conjunto obtenido. En este estudio se proponen métricas de desempeño basadas en modelos de análisis envolvente de datos (DEA) para evaluar diferentes criterios de desempeño, los que corresponden a versiones enteras del modelo slacks-based measure (SBM). Se evalúan varios conjuntos de soluciones no dominadas obtenidas mediante diferentes métodos de solución para demostrar la adecuación de las métricas propuestas. Estos conjuntos consideran soluciones no dominadas con valores negativos o cero, ubicadas en las regiones convexas o no convexas de la frontera de Pareto, asumiendo simultáneamente diferentes sentidos de las funciones objetivo.**

Keywords*— *Data Envelopment Analysis, Optimización Multiobjetivo, Métricas para Métodos Multiobjetivo.

I. Introducción

El análisis envolvente de datos (DEA) es una técnica de análisis de eficiencia propuesta por Charnes et al. (1978). DEA es una técnica no paramétrica utilizado para evaluar la eficiencia relativa de unidades de toma de decisiones que operan bajo condiciones similares. DEA compara unidades de tomando en cuenta múltiples entradas y salidas, y evalúa su eficiencia relativa al encontrar la envoltura más eficiente para los datos.

Por otro lado, la optimización multiobjetivo implica la optimización de múltiples objetivos en conflicto. El enfoque multiobjetivo es muy importante en problemas en los cuales no se puede optimizar un objetivo sin sacrificar otro objetivo. Es así como en la literatura se encuentras problemas de optimización multiobjetivo aplicado a diversas áreas como la agricultura (Gómez-Lagos et al., 2024; Montenegro-Dos Santos et al., 2023), el transporte (Demir et al., 2014; Fernández-Puratich et al., 2021), entre otros.

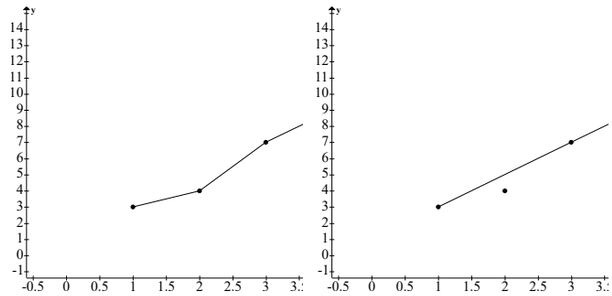
Debido a la importancia de la optimización multiobjetivo es que se han propuesto una diversidad de algoritmos exactos y metaheurísticos. Dentro de los algoritmos exactos se encuentran ε-constraint (HAIMES, 1973), método de los pesos (Zadeh, 1963), método de los pesos ponderados (Grodzevich & Romanko, 2006) entre otros. mientras que los algoritmos metaheurísticos se encuentran GRASP multiobjetivo (Martí et al., 2015), NSGA-II (Deb et al., 2002), entre otros. Debido a esto, es necesario evaluar la eficiencia de los métodos para obtener soluciones no dominadas con la finalidad de determinar cuál es el método más adecuado para resolver un problema en específico. Es así como se han propuesto diversas métricas en categorías como diversidad, exactitud y precisión para poder evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos.

En este trabajo se va a proponer una métrica para evaluar la forma de la frontera de Pareto usando modelos basados DEA. El método propuesto considerará la existencia de objeticos de solo minimización, solo maximización o minimización y maximización, además de objetivos que pueden tener valores cero o negativos.

II. Materiales y métodos

El modelo matemático propuesto es de súper-eficiencia, esto quiere decir que evalúa la frontera de Pareto resultante al eliminar del conjunto de soluciones la solución bajo evaluación (Andersen y Petersen, 1993). Debido a que se considera que la frontera de Pareto resultante puede tener regiones no convexas es que la solución bajo evaluación puede quedar por sobre o bajo la nueva frontera de Pareto. Debido a esto es que se utiliza una medida de eficiencia que evalúa el valor absoluto de la medida de eficiencia. En la Figura 1 se puede observar un ejemplo en el cual se evalúa la eficiencia de una solución no dominada. En la Figura 1.a es posible observar que la solución se encuentra sobre la frontera de Pareto cuando la solución se encuentra en la región convexa de la frontera de Pareto. En la Figura 1.b se muestra que la solución se encuentra bajo la frontera de Pareto cuando la solución bajo evaluación se encuentra en la región no convexa de la frontera de Pareto.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE



a) Solución bajo evaluación en la región convexa

b) Solución bajo evaluación en la región no convexa

Figura 1. Ejemplo de solución bajo evaluación

Se espera que el modelo matemático logre medir la eficiencia de la solución bajo evaluación en la región de la frontera de Pareto creada al eliminar esta solución bajo evaluación. Cade destacar que el modelo matemático propuesto se basa en el slacks-based measure propuesto por Tone (2001).

III. Resultados

Se consideraron diferentes conjuntos de soluciones no dominadas, para evaluar cual representa de mejor manera la forma de la frontera de Pareto. Los resultados obtenidos lograron determinar cuáles de las fronteras de Pareto obtenidas representan de mejor manera la forma original de la frontera de Pareto, tomando en cuenta que pueden existir regiones no convexas de la frontera de Pareto.

IV. Conclusiones

La evaluación del conjunto de soluciones no dominadas es importante para evaluar la calidad de los algoritmos propuestos. Debido a este motivo es importante tener metodologías que logren poder discriminar correctamente la calidad de los métodos de solución propuestos. Es por esto que en este trabajo se propuse un modelo matemático basado en el análisis envolvente de datos para discriminar conjuntos de soluciones no dominadas usando como criterio la forma de la frontera.

Los resultados obtenidos mostraron la efectividad del modelo matemático para discriminar entre los diferentes conjuntos de soluciones no dominadas independientemente de la convexidad o no convexidad de la frontera de Pareto.

Referencias

Andersen, P., Petersen, N.C. (1993). A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis. *Management Science,* 39(10): 1261–1264.

Charnes, A., Cooper, W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6): 429–444.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. In *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (Vol. 6, Issue 2).

Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). The bi-objective Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, *232*(3): 464–478. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.002

Fernández-Puratich, H., Rebolledo-Leiva, R., Hernández, D., Gómez-Lagos, J. E., Armengot-Carbo, B., & Oliver-Villanueva, J. V. (2021). Bi-objective optimization of multiple agro-industrial wastes supply to a cogeneration system promoting local circular bioeconomy. *Applied Energy*, *300*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117333

Gómez-Lagos, J. E., González-Araya, M. C., Acosta-Espejo, L. G., & Soto-Silva, W. E. (2024). Supporting tactical harvest planning decisions of major fruits through a multi-objective modeling approach by using exact methods. *Expert Systems with Applications*, 123929. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123929

Grodzevich, O., & Romanko, O. (2006). Normalization and Other Topics in MultiObjective Optimization. *Proceedings of the Fields–MITACS Industrial Problems Workshop*, 89–101.

Haimes, Y. Y. (1973). *Integrated System Identification and Optimization* (C. T. LEONDES, Ed.; Vol. 10, pp. 435–518). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-012710-8.50013-3

Martí, R., Campos, V., Resende, M. G. C., & Duarte, A. (2015). Multiobjective GRASP with path relinking. *European Journal of Operational Research*, 240(1): 54–71. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.042

Montenegro-Dos Santos, F., Pérez-Galarce, F., Monardes-Concha, C., Candia-Véjar, A., Seido-Nagano, M., & Gómez-Lagos, J. (2023). A Rolling Horizon scheme for rescheduling in agricultural harvest. *Computers and Electronics in Agriculture*, *215*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108392

Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, *130*(3), 498–509. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5

Zadeh, L. (1963). Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *8*(1), 59–60. https://doi.org/10.1109/TAC.1963.1105511

Session N°6 – Track N°1

Master's and Bachelor's Theses

Chair: Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*
Place: X-103
Time: 10:10 – 11:55

Online Multi-Appointment Scheduling for Oncology Patient Treatment: A MILP and Rolling Horizon Stochastic Approach

Time: 10:10 – 10:25
Authors:

- Fredes, M. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Dávila-Gálvez, S. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Quezada, F. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Consumer Learning and Assortment Planning under Social Feedback

Time: 10:28 – 10:43
Authors:

- Solar, F. *(Universidad de Chile)*
- Sauré, D. *(Universidad de Chile)*

Patient Flow Management in a Complex Hospital Network Through Reinforcement Learning

Time: 10:46 – 11:01
Authors:

- Geyter, M. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Vera-Andreo, J. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Larraín, H. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

From Efficiency to Safety: A Simulation-based Framework for Evaluating Empty-Container Terminal Layouts

Time: 11:04 – 11:19
Authors:

- Vera-Carrasco, C. *(Universidad del Desarrollo)*
- Muñoz-Herrera, S. *(Universidad del Desarrollo)*
- Vega, M. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Palma, C. *(Universidad del Desarrollo)*

Programación de la Recolección de Residuos Reciclables basado en Ruteo Vehicular con Múltiples Productos y Múltiples Periodos

Time: 11:22 – 11:37
Authors:

- Vilches-Carrillo, V. *(Universidad Austral de Chile)*
- Zambrano-Suárez, J. *(Universidad Austral de Chile)*

Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones para la Planificación Agregada, Desagregada y Requerimiento de Insumos para la Producción en CAPEL

Time: 11:40 – 11:55
Authors:

- Galleguillos, S. *(Universidad Católica del Norte)*
- Muñoz, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tapia, K. *(Universidad Católica del Norte)*
- Monardes-Concha, C. *(Universidad Católica del Norte)*

Online Multi-Appointment Scheduling for Oncology Patient Treatment: A MILP and Rolling Horizon Stochastic Approach

Macarena Fredes, Sebastián Dávila-Gálvez, Franco Quezada
Department of Industrial Engineering, University of Santiago of Chile, Chile

Cancer is the leading cause of death in developed countries, with over 2.8 million diagnoses annually in the Americas alone. The oncology clinic route (OCR) comprises the sequence of medical events from patient arrival to treatment completion, with minimum and maximum time thresholds ensuring clinical efficacy and safety. Each 7-day delay reduces treatment effectiveness by 5%.

This work addresses multi-appointment scheduling for oncology patients, minimizing tardiness under hospital resource constraints through online algorithms, mixed-integer linear programming (MILP) models, and stochastic formulations with rolling horizon strategies. We consider patients with predefined sequences of medical events represented as directed acyclic graphs, scheduled over time horizons with limited resources.

We evaluate three approaches: MILP with perfect information, online algorithms (ASAPS, SBOR, PSS), and Two-Stage Stochastic Programming (TSSP) with three rolling horizon strategies. We use data from the Arturo López Pérez Foundation of Chile, focusing on breast and thyroid cancer (33% of cases), with low, medium, and high demand scenarios. SBOR emerges as the most effective online algorithm, outperforming even MILP in average tardiness per patient (3.06-8.57 days versus 5.67-10.63 days) by strategically reserving early periods for future events. MILP with perfect information reduces tardiness up to 26-fold compared to current practices. TSSP strategies show variable effectiveness depending on demand. The proposed methods demonstrate significant improvements over current practices, reducing delays by factors of 3 to 6 while maintaining computational efficiency for real-time implementation.

Consumer Learning and Assortment Planning under Social Feedback

Felipe Del Solar
Industrial Engineering, University of Chile
Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería
Santiago, Chile
fdelsolar@isci.cl

Denis Sauré
Industrial Engineering, University of Chile
Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería
Santiago, Chile
dsaure@uchile.cl

***Abstract*—We study dynamic assortment planning when consumers learn from reviews posted by previous buyers. Consumers arrive sequentially, observe a subset of products (the retailer's assortment), and make multinomial logit (MNL) choices based on estimated product utilities. Each purchase reveals a realised utility (a review), which feeds back into later estimates. We formalise several information regimes, from fully rational Bayesian learning with complete feedback to bounded-rational rules that rely on simple statistics. We deliberately retain only the most relevant formal results and replace secondary derivations with narrative explanations. We establish almost-sure convergence of perceived qualities under complete feedback, characterise how selection effects bias perceptions under naive rules, and discuss a static single-assortment optimization (OESS) surrogate with a non-linear outside option induced by social learning. For dynamics, we outline a fluid approximation that motivates the regret notion and present two explore–exploit policies at a high level. Both achieve logarithmic regret in time; the focused policy attains a smaller constant by concentrating exploration on potentially optimal products. Monte Carlo experiments support these insights.**

***Index Terms*—Assortment optimization, consumer learning, multinomial logit, multi-armed bandits, social feedback**

I. Relevant Literature

Social learning distorts perceived quality when consumers rely on biased average reviews [8]. Naive and bias-correcting consumers can reinforce misperceptions, creating inefficient feedback loops [5]. Some works use fluid approximations to study these dynamics [15], and others analyze the strategic implications of selection effects, such as dynamic pricing and targeted marketing [14].

The lasting influence of early reviews has motivated approaches that rebalance the weight of past and recent evaluations [12], and raised questions about the accuracy of reviews as indicators of true quality [11]. The speed and reliability of belief aggregation also depend on the underlying network: dense structures promote convergence [1], but limited connectivity can hinder learning, even under Bayesian updating [2, 10].

These effects have been linked to informational cascades and herd behaviour, where early signals generate adoption patterns disconnected from actual quality [4, 6, 20].

On the operational side, static assortment optimization under MNL models is well understood when preferences are known [16, 18], but becomes NP-hard with uncertainty [17]. To address this, approximation and heuristic methods have been developed.

Dynamic settings are typically addressed via the Multi-Armed Bandit (MAB) framework, which models the exploration–exploitation trade-off. Foundational results establish logarithmic regret as a performance limit for consistent policies [13], with near-optimal strategies like UCB in finite horizons [3]. Further theoretical insights are provided in reviews of MAB algorithms [7, 19], and efficient index-based policies such as Gittins indices offer practical implementations [9].

II. Consumer Learning Model

We study a retailer offering assortments over T periods with capacity C. Consumers follow an MNL choice model with profits r_i, forming quality estimates from feedback θ_t. The retailer adapts assortments to maximize profit. Under full Bayesian updating, estimates converge to true qualities. With limited feedback, consumers update naively from averages, generating biased beliefs that make frequently offered products appear more attractive.

III. Assortment Optimization

Static Optimization of a Single Assortment. We study the static problem where a fixed assortment S is offered each period to compare long-run revenues.

The goal is to find the assortment that maximizes the expected revenue per consumer under a fixed assortment. The optimization problem is NP-Hard due to the non-linear dependence of the outside option on the assortment.

To address this, the problem is reformulated using a parameter $\lambda > 0$ and slack variable $g \in (0, 1)$. The equivalent problem becomes:

$$\max_{x_j \in 0,1} \sum_{j \in \mathcal{N}} \nu_j (r_j - \lambda) x_j \tag{1a}$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in \mathcal{N}} x_j \leq C \quad \sum_{j \in \mathcal{N}} x_j \nu_j \geq g^{-1} - g \qquad g \geq 0 \tag{1b}$$

Where $\nu_i = \exp(\mu_i/2)$. A binary search on λ using feasibility tests on this reformulation yields an efficient approximation algorithm for the optimal static assortment.

Dynamic Assortment Optimization This section examines the retailer's dynamic decision problem, where the objective is to maximise cumulative revenue over a sales season by adapting the assortment over time. Since the consumer choice dynamics are driven by a vector of unknown mean qualities, the retailer faces a fundamental trade-off between learning (exploration) and revenue collection (exploitation). This naturally leads to a formulation as a Multi-Armed Bandit (MAB) problem.

Inspired by the foundational work of [13], the analysis focuses on policies that perform consistently well across all problem instances, avoiding those that exploit specific favourable structures while performing poorly elsewhere. Formally, the retailer selects a dynamic assortment policy $\pi \equiv \{\pi^t : t \in \mathbb{N}\}$, where each $\pi^t = S^{\pi,t} \in \mathcal{S}$ is a random assortment adapted to the filtration $\mathcal{F} \equiv \{\mathcal{F}_t : t \in \mathbb{N}\}$, representing the sales history up to period t. The set $\mathcal{P}$ denotes all such consistent policies.

In line with standard MAB frameworks, the regret of a policy $\pi \in \mathcal{P}$ is defined as the difference in expected cumulative revenue between an oracle (who knows the true values of μ) and the policy π. However, unlike classical MAB settings, the oracle's strategy here is not trivial to characterize due to the complexity introduced by assortment-dependent choice probabilities and information dynamics.

1) Oracle Policy and Regret: In order to understand the behaviour of an optimal benchmark, this section adapts a fluid model originally proposed by another previous work to the setting of this thesis [15]. The purpose is to construct a continuous-time approximation that allows us to describe how a fully informed oracle would behave, and to later evaluate how a learning retailer compares to this benchmark through the notion of regret.

The key idea is to approximate the discrete-time dynamics of product purchases and belief updates through a system of ordinary differential equations (ODEs). Let $n_{i,t}$ denote the cumulative number of purchases of product i up to time t, and $\bar{q}_{i,t}$ the running estimate of its mean quality. Under mild regularity assumptions, it can be shown that each estimated quality $\bar{q}_{i,t}$ can be expressed as a differentiable function of $n_{i,t}$, i.e., there exists a function $\hat{Q}_i$ such that:

$$\bar{q}_{i,t} = \hat{Q}_i(n_{i,t}).$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{q}}_{i,t} = \frac{\dot{n}_{i,t}}{n_{i,t}} \left(\mu_i + \ln\left(1 + \sum_{j \in \mathcal{N}} \exp(\bar{q}_{j,t})\right) - 2\bar{q}_{i,t} \right), \\ \dot{n}_{i,t} = \Lambda \sum_{S \in \mathcal{S}} \rho_S(t) \hat{d}_i(\bar{q}_t, S), \quad \forall i \in \mathcal{N}, \\ \bar{q}_{i,0} = \mu_i, \quad n_{i,0} = 1. \end{cases} \tag{2}$$

This allows us to formulate the oracle's optimal control problem. Since the oracle knows the true qualities μ, it chooses a policy π^* that maximises expected cumulative revenue over a horizon T while adhering to the belief tracking dynamics embedded in (2). The problem is then reduced to selecting the optimal $\rho(t)$ over time to maximise long-term performance.

Ultimately, this construction provides a benchmark against which we can evaluate learning policies. The regret $\mathcal{R}^\pi(T, \mu)$ of a policy π is defined as the revenue loss relative to the oracle. Regret is thus interpreted as a measure of time (or customers) lost due to imperfect learning.

2) Fundamental Limit of Achievable Performance: This section establishes a lower bound on the regret of any consistent policy by leveraging a change-of-measure argument originally developed in [13]. Following the approach in [18], the analysis begins by identifying $\widetilde{\mathcal{N}}$, the set of products that are not included in the optimal expected steady-state solution (OESS), but could potentially enter the optimal assortment under a counterfactual change in their mean quality. This captures the set of alternatives that may appear optimal in a nearby problem instance and are thus essential for proper statistical discrimination.

To ensure that the retailer performs well across all plausible parameter configurations, we restrict attention to *consistent policies*. A policy π is said to be consistent if, for every possible quality vector $\nu \in \mathbb{R}^{\mathcal{N}}$ and every $a > 0$, the regret grows sub-polynomially:

$$\frac{R^\pi(T, \nu)}{T^a} \to 0 \quad \text{as } T \to \infty.$$

This ensures that the policy remains robust across all possible "realities" represented by the unknown vector μ. A policy that bets incorrectly on a specific realization of μ may incur unbounded regret in the long run. Consistency thus prevents pathological behaviour and guarantees that performance is asymptotically optimal in every feasible world. Then it can be found a fundamental limit on the regret that any such consistent policy must have for all T,:

$$R^\pi(T, \mu) \geq \left\lceil \frac{|\widetilde{\mathcal{N}} \setminus S^*(\mu)|}{C} \right\rceil \cdot H \cdot \log(T) + K.$$

Where $H, K > 0$ are finite constants. This result establishes that logarithmic regret is the best achievable rate, and that policies must dedicate sufficient exploration to each potentially optimal product to remain competitive. It also provides a roadmap for designing policies that can balance revenue maximization with robust learning guarantees.

3) Assortment Policies for the Retailer: From above result, it follows that the regret of any consistent policy under an unknown quality vector is $\mathbf{O}(\log(T))$. This raises the natural question of how to design a policy that makes efficient use of this minimal loss. The standard approach is to adopt an "Explore–Exploit" structure. Specifically, assuming prior knowledge of the time horizon T, it is reasonable to display each product to a number of consumers proportional to $\log(T)$ and use this data to estimate the unknown quality vector.

However, this approach hinges on the accuracy of the estimator: a poorly estimated quality vector renders the exploration phase ineffective, resulting in regret that may scale linearly with T. The estimator proposed in the literature by [18] does not converge asymptotically to the true mean quality under social learning conditions, and is therefore not

appropriate for this setting. To overcome this limitation, the following estimator is proposed:

$$\hat{\mu}_{i,t}^2 := \frac{\sum_{u=1}^{t-1}(U_{i,t} - \mathbb{E}\{\varepsilon_{i,u} \mid \bar{q_u}\})1_{\{i\in S_u, i_u=i\}}}{\sum_{u=1}^{t-1} 1_{\{i\in S_u, i_u=i\}}}, \quad \forall i \in \mathcal{N} \tag{3}$$

It was then proven that this estimator converges to the true quality for those products that are shown infinitely often. So based on this, a simple explore–exploit policy can be defined. The algorithm first explores by offering all assortments to a small sample of consumers, then exploits by estimating preferences and offering the best assortment to the remaining consumers.

This policy achieves a regret of order $\mathbf{O}\left(\lceil \frac{\mathbf{N}}{\mathbf{C}} \rceil \log \mathbf{T}\right)$, as established by the following formal upper bound for Algorithm 1:

$$R^{\pi_1}(T,\mu) \leq \tau \left(\left\lceil \frac{N}{C} \right\rceil \log T \right) + \bar{K}_1,$$

for some constants $\bar{K}_1$ and $\bar{\tau}_1$, and for all T provided that $\tau > \bar{\tau}_1$.

The constant $\bar{\tau}_1$ ensures that the probability of incorrectly estimating the mean qualities—and consequently not choosing the optimal OESS solution—is asymptotically negligible as T increases. It is worth noting that policy π_1 explores all products uniformly, without leveraging the structure of potentially optimal items. To improve efficiency, policy π_2 restricts exploration to the subset $\widetilde{\mathcal{N}}$ of potentially optimal products. This refinement ensures that exploration is concentrated on high-value candidates, avoiding unnecessary trials on suboptimal items.

Importantly, π_2 operates without knowledge of the time horizon T and switches to exploitation once each candidate has been sufficiently tested. Theoretical analysis shows that this policy achieves a regret bound of order $\log T$ multiplied by the size of $\widetilde{\mathcal{N}} \setminus S^*(\mu)$, plus a constant term.

ACKNOWLEDGMENT

This work is partially funded by ANID (projects Fondecyt 1420492 and PIA/PUENTE AFB230002).

REFERENCES

[1] Daron Acemoglu, Munther Dahleh, Ilan Lobel, and Asuman Ozdaglar. Rate of convergence of learning in social networks. pages 2825–2830, 2009.

[2] Daron Acemoglu, Munther A Dahleh, Ilan Lobel, and Asuman Ozdaglar. Bayesian learning in social networks. *The Review of Economic Studies*, 78(4):1201–1236, 2011.

[3] Peter Auer, Nicolò Cesa-Bianchi, and Paul Fischer. Finite-time analysis of the multi-armed bandit problem. *Machine Learning*, 47(2-3):235–256, 2002.

[4] Abhijit V Banerjee. A simple model of herd behavior. *The Quarterly Journal of Economics*, pages 797–817, 1992.

[5] Omar Besbes and Marco Scarsini. On information distortions in online ratings. *Operations Research*, 66(3):597–610, 2018.

[6] Sushil Bikhchandani, David Hirshleifer, and Ivo Welch. A theory of fads, fashion, custom, and cultural change as informational cascades. *Journal of political Economy*, 100:992–1026, 1992.

[7] Sébastien Bubeck and Nicolò Cesa-Bianchi. Regret analysis of stochastic and nonstochastic multi-armed bandit problems. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 5(1):1–122, 2012.

[8] Talluri Chen, Li. Reviews and self-selection bias with operational implications. *Available at SSRN 3407477*, 2019.

[9] John Gittins, Kevin Glazebrook, and Richard Weber. *Multi-armed bandit allocation indices*. John Wiley & Sons, 2011.

[10] Wade Hann-Caruthers, Vadim V. Martynov, and Omer Tamuz. The speed of sequential asymptotic learning. *Journal of Economic Theory*, 173:383–409, 2018.

[11] Nan Hu, Paul A. Pavlou, and Jennifer Zhang. Can online reviews reveal a product's true quality? empirical findings and analytical modeling of online word-of-mouth communication. pages 324–330, 2006.

[12] Nan Hu, Paul A. Pavlou, and Jie Jennifer Zhang. On self-selection biases in online product reviews. *MIS Quarterly*, 41:449–471, 2017.

[13] Tze Leung Lai and Herbert Robbins. Asymptotically efficient adaptive allocation rules. *Advances in Applied Mathematics*, 6(1):4–22, 1985.

[14] Xinxin Li and Lorin M Hitt. Self-selection and information role of online product reviews. *Information Systems Research*, 19(4):456–474, 2008.

[15] Vaccari Maglaras, Scarsini. Social learning from online reviews with product choice. *Available at SSRN 3101747*, (18-17), 2021.

[16] Paat Rusmevichientong, Zuo-Jun Max Shen, and David B Shmoys. Dynamic assortment optimization with a multinomial logit choice model and capacity constraint. *Operations research*, 58(6):1666–1680, 2010.

[17] Paat Rusmevichientong, David Shmoys, Chaoxu Tong, and Huseyin Topaloglu. Assortment optimization under the multinomial logit model with random choice parameters. *Production and Operations Management*, 23(11):2023–2039, 2014.

[18] Denis Sauré and Assaf Zeevi. Optimal dynamic assortment planning with demand learning. *Manufacturing & Service Operations Management*, 15(3):387–404, 2013.

[19] Aleksandrs Slivkins. Introduction to multi-armed bandits. *arXiv preprint arXiv:1904.07272*, 2019.

[20] Ivo Welch. Sequential sales, learning, and cascades. *Journal of Finance*, 47:695–732, 1992.

Patient flow management in a complex hospital network through reinforcement learning

1st Matías De Geyter
Dept. of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
mdegeyter@uc.cl

2nd Jorge Vera
Dept. of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
jver@uc.cl

3rd Homero Larraín
Dept. of Transportation Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
homero@uc.cl

***Abstract*—Decision-making in healthcare is a complex problem due to its inherent uncertainty and dynamic nature, particularly when it comes to patient admissions across a network of hospitals. This research addresses these challenges by examining an integrated approach that considers the collective capacity of various hospital units, allowing for both admissions and inter-hospital patient transfers. We formulated this dynamic decision problem as a Markov Decision Process and solved it using a Reinforcement Learning (RL) framework, specifically the Q-learning algorithm. The expected future cost is estimated using an XGBoost model, and simulation techniques supplement the approach. The results from our RL strategy have been translated into straightforward, practical managerial guidelines for hospitals. Preliminary computational results from a network of three hospitals using synthetic data have shown promising outcomes. There is a notable 9% reduction in average service time and a 61% reduction in total costs compared to the baseline scenario, where decisions are made using a myopic criterion. Specifically, the social costs associated with waiting times and patient bed opportunity costs are reduced by 74%, and the operational costs due to admissions, transfers, and diversions are reduced by 9%. These findings highlight the potential of advanced analytical techniques to significantly enhance hospital operations and patient care.**

***Index Terms*—Healthcare Management, Approximate Dynamic Programming, Simulation, Markov Decision Process, Reinforcement Learning**

I. Introduction

Healthcare is essential to human development and quality of life. It has been shown that access to healthcare is a critical factor that significantly influences health outcomes [33, 37]. The Sustainable Development Goals proposed by the United Nations (UN) in 2015 also highlighted the importance of healthcare for human well-being [30]. Thus, the UN target for 2030 in healthcare aims to achieve universal health coverage, ensuring that all individuals have access to high-quality, essential healthcare services.

A relevant and specific problem in healthcare is bed management. It is important to understand and improve the use of hospital beds in a hospital network by transferring patients between hospitals and managing the movement of inpatients (i.e., patients admitted to a hospital) between hospital sections.

This research was partially supported by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) through the National Master's Scholarship No. 22231602.

As reported by [8, 10, 25], this problem offers significant opportunities for Operations Research tools to improve the efficiency and effectiveness of bed management decisions.

To address bed management decisions, we consider a public entity. This entity coordinates and manages the beds in the public system, in cooperation with the private system when needed. Its main actions are transfers—moving the patient between two hospitals within the public network; diversions—moving the patient to a clinic in the private system to provide a medical resolution; and admissions— admitting the patient to the hospital for medical care. In Chile's case, this entity has a reactive policy, in which transfers and diversions are performed only when a hospital's capacity does not allow an admission [11], leading to high treatment costs, network congestion, and long wait times for patients [17].

II. Literature Review

Operations research tools are used to prevent overcrowding, ensure smooth patient flow, and enhance service quality. Studies have increasingly focused on hospital optimization since the early 2000s [10, 25]. Specifically, the dynamic hospital network management problem, which optimizes admissions, transfers, and diversions within a healthcare network, has received little attention due to its high complexity.

Three distinguishable studies focus on different aspects of the problem. Reference [35] focuses on the admission control of elective patients in a waiting list. Secondly, [14] addresses admissions, transfers, and diversions in a complex hospital network of emergency patients. Lastly, [7] studied the management of inpatient flows between the emergency department and other hospital units. Although each of them has made great contributions, hospital research needs an integrated approach to deliver practical solutions [10]. This is essential to achieve a real-world solution that can be effectively implemented.

In recent years, there has been a growing interest in integrating machine learning models into optimization, leading to numerous publications and the development of research software packages. In our case, we focus on the Gurobi Machine Learning package: a Python package that helps use trained regression models in mathematical optimization models [9]. This approach enables modeling the problem's nonlinear relations using a machine learning regressor—an improvement

proposed by [7, 14]—compared to the Approximate Linear Optimization Approach used by both authors.

III. Problem Description

Our main objective is to enhance the public network bed management policy, specifically focusing on reducing operational costs and wait times, thereby improving the overall patient experience. This requires developing an integral model that considers all the features from the literature review, as well as considering that it must have the possibility of scaling up to real-world scenarios, and the possibility of retrieving a simple management policy.

The problem considers a Macro-Scale dimension in which elective and emergency demand arrive. For instance, Fig. 1 illustrates demand arrival and possible actions for emergency demand. On the other hand, the Micro-Scale dimension considers inpatient management within a hospital and its respective units. Fig. 2 illustrates the inpatient flow management problem. It is important to observe that we outline some uncommon transitions to facilitate the representation of the case study. We connect both scales, where decisions from the Macro-Scale (diversions, admissions, and transfers) will affect each hospital's resource utilization, requiring optimal inpatient management across each hospital's units. To model this problem, a reasonable time frame between actions must be defined. As stated by [7, 14], time discretization must be aligned with the decisions being taken, which, in our case, uses a 12-hour frame.

We consider the patients aggregation by Diagnosis-Related-Groups (DRGs) proposed by [5, 6]. This clustering leads to a reasonable number of patient types to manage. Additionally, the DRG classification system in Chile, as noted by [34], facilitates collaboration between clinical and managerial staff, improving patient flow. Considering this, it is easier to determine the length-of-stay (LoS) distributions for each DRG group [16, 23, 36, 38], patient flow models [1, 7, 23, 29, 31], waiting time costs [15, 20], and other social costs [2, 12, 24, 27]

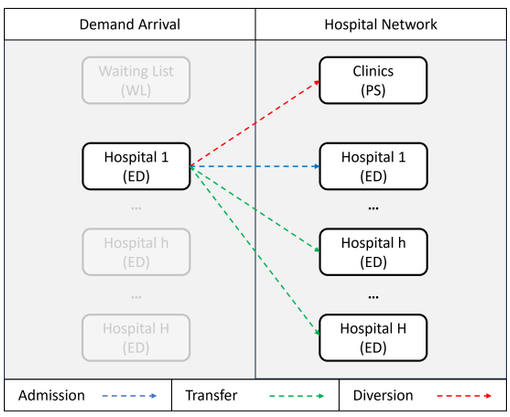


Fig. 1. Macro-Scale dimension of the problem for emergency demand.

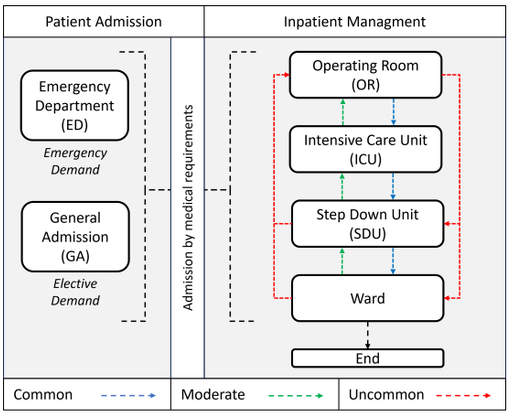


Fig. 2. Micro-Scale dimension of the problem.

IV. Solution Approach

Given the problem characteristics, we considered a Markov Decision Process (MDP) formulation. The Bellman Equations for this MDP, where it is expected to minimize the cost function:

$$C\left(y^{(1)}\right) = \min_{x \in \mathbb{X}\left(y^{(1)}\right)} \left\{ c\left(y^{(1)}, x\right) + \lambda \sum_{u \in \mathbb{Y}^{(1)}} C(u) p\left(u \mid y^{(2)}\right) \right\} \quad \forall\, y^{(1)} \in \mathbb{Y}^{(1)} \quad (1)$$

Where $y^{(1)}$ represents the pre-decision state (initial network status), $y^{(2)}$ the post-decision state (final network status), x represents the actions (admissions, diversions and transfers), $c\left(y^{(1)}, x\right)$ the immediate cost, and u represents the possible future states. The model must choose actions that satisfy the pre-decision-to-post-decision flow-balance constraints, as well as capacity, budget, and integrality constraints. It is important to note that the immediate cost function $c\left(y^{(1)}, x\right)$ consists of operational costs from admissions, transfers, and diversions, as well as social costs associated with patients' waiting times.

The complexity of the problem arises from numerous system states and stochastic transitions, necessitating an approximate approach that modifies the traditional Bellman Equations [21, 22]. This results in the following problem:

$$C\left(y^{(1)}\right) = \min_{x \in \mathbb{X}\left(y^{(1)}\right)} \left\{ c\left(y^{(1)}, x\right) + \lambda \mathbb{Q}\left(y^{(2)}\right) \right\} \quad \forall\, y^{(1)} \in \mathbb{Y}^{(1)} \quad (2)$$

Where $\mathbb{Q}\left(y^{(2)}\right)$ is a function that represents the expected value of the post-decision state $y^{(2)}$. We proposed estimating $\mathbb{Q}$ using Q-learning, a method for agents to learn optimal behavior in regulated Markovian environments [32]. We used the Reinforcement-Learning methodology to optimize a cumulative future reward signal [26], expected to be represented by $\mathbb{Q}$. Additionally, given a trained regressor model, which in our case is an XGBoost model, we can mathematically formulate it as $\mathbb{Q}$, following the proposals of [3, 13] and implement it using the Gurobi Machine Learning package.

V. Results

Although trained and tested on a specific set of instances, the methodology should adapt to any scenario without losing generality, thanks to the flexibility of the machine learning

TABLE I
SUMMARY OF THE OPTIMIZATION MODELS

Policy	Average Execution Time [s]	Integer Variables	Continuous Variables	Constraints
π_M	0.01	1,200	0	713
$\pi_{\mathbb{Q}}$	0.16	8,577	1,001	3,630

TABLE II
SUMMARY OF THE POLICIES' RESULTS AND COMPARISON (95% CI)

	Total Cost	Diversions Cost	Transfers Cost	Social Cost
π_M	15.30	3.07	0.13	12.06
$\pi_{\mathbb{Q}}$	5.95	2.62	0.31	3.03
Difference	[9.10, 9.59]	[0.27, 0.63]	[-0.18, -0.18]	[8.94, 9.12]

approach. We will focus on the behavior and improvements of the obtained policy regarding costs, occupation, and waiting times, reviewing the actions being taken in general terms. The latter is because it is not feasible to determine the optimal action in every possible state. We consider different scenarios with varying numbers of DRGs, as well as distributions of elective and emergency demand, based on the literature. Regarding the public network, we consider a system of 3 hospitals with identical bed capacity to isolate the effects of demand mix and DRG-specific dynamics.

We focus on the instance that incorporates heterogeneity in service times and social costs at the hospital level across the network. We compare the myopic policy π_M, which optimizes the present without considering long-term impact, and the Q-learning policy $\pi_{\mathbb{Q}}$, which accounts for long-term effects in decision-making via a reinforcement learning process to predict future costs through the $\mathbb{Q}$ function. Fig. 3 illustrates the training process for the best training trial. The optimization model associated with each policy is described in Table I. Table II summarizes the results of the policies. In addition to the reductions in total costs, due to improvements in both social and operational dimensions, it is important to note that we achieved an average reduction of 1.63 service days per patient (12.69%).

Although algorithms can improve decision-making, people often resist relying on them—an effect known as algorithm aversion [4], documented in domains including healthcare management. Because the $\pi_{\mathbb{Q}}$ policy relies on a machine-learning model and may be hard to interpret, it can exacerbate this aversion. To mitigate it, we combine model insights with medical guidelines to design a policy that is practical, robust, and effective in real settings. Hence, we develop policy π_K, tailored for implementation in these scenarios.

Based on the $\pi_{\mathbb{Q}}$ policy results, as well as a curated analysis of occupation levels and DRG specialization at each hospital of the network, we contemplated that units in the hospital network should operate with target occupancy thresholds [18, 19]; when occupancy is below target, policies remain unchanged, but once it is exceeded, demand should be relieved via patient transfers or diversions. Elective treatment categories should also have caps on waiting-list requests; if these limits are exceeded, admissions proceed only when permitted by the occupancy guideline; otherwise, diversion measures are recommended to avoid excessive waits. Finally, to improve network efficiency, hospitals are encouraged to specialize in certain DRGs [5, 28], clarifying admission rules and facilitating smoother inter-hospital transfers. Table III summarizes the new policy results. In addition to cost reductions, we achieved an average reduction of 1.19 service days per patient (9.24%) compared to the base scenario. Although the results are slightly worse in policy π_K compared to policy $\pi_{\mathbb{Q}}$, the intrinsic simplicity and feasibility of real-world implementation compensate for the cost of the improvement.

TABLE III
SUMMARY OF THE NEW POLICY RESULTS AND COMPARISON (95% CI)

	Total Cost	Diversions Cost	Transfers Cost	Social Cost
π_M	15.17	3.01	0.13	12.01
π_K	5.96	2.61	0.24	3.08
Difference	[8.96, 9.48]	[0.23, 0.58]	[-0.11, -0.11]	[8.81, 9.06]

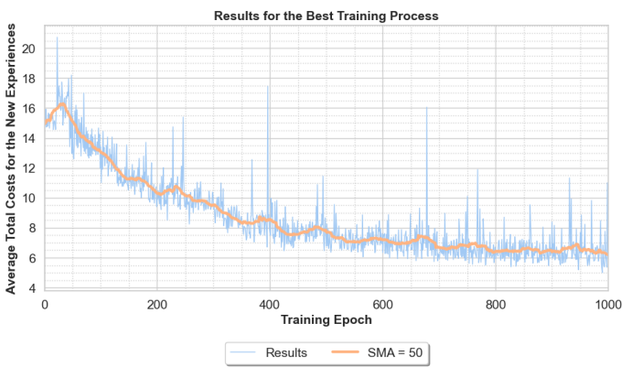


Fig. 3. Results for the best training process.

VI. CONCLUSIONS

We present a hospital-network model that integrates a centralized waiting list with a public network comprising multiple unit types, including the private system. This model supports the decision process to optimize management of transfers, diversions, admissions, and inpatient care at each hospital in the network. Building on this, we propose a novel Approximate Dynamic Programming approach that captures nonlinear relationships among variables while accounting for expected future costs in the dynamic hospital management problem. By implementing this approach, we shift from reactive to proactive management, reducing operational and social costs, ultimately enhancing the patient experience. Finally, we validate hospital management guidelines and demonstrate that combining algorithmic methods with expert knowledge yields simple yet effective policies for managing the healthcare system. These guidelines are: (i) Recommended occupation levels, (ii) Waiting list size management, and (iii) Case-Mix specialization by hospital. The simplified policy achieves results comparable to those of the reinforcement learning model.

References

[1] D. Astaraky and J. Patrick. "A simulation based approximate dynamic programming approach to multi-class, multi-resource surgical scheduling". In: *European Journal of Operational Research* 245.1 (2015), pp. 309–319. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.02.032.

[2] A. Batista, D. Pozo, and J. Vera. "Managing the unknown: A distributionally robust model for the admission planning problem under uncertain length of stay". In: *Computers amp; Industrial Engineering* 154 (2021), p. 107041. ISSN: 0360-8352. DOI: 10.1016/j.cie.2020.107041.

[3] D. Bertsimas and J. Dunn. "Optimal classification trees". en. In: *Mach. Learn.* 106.7 (2017), pp. 1039–1082. DOI: https://doi.org/10.1007/s10994-017-5633-9.

[4] B. J. Dietvorst, J. P. Simmons, and C. Massey. "Algorithm aversion: People erroneously avoid algorithms after seeing them err." In: *Journal of Experimental Psychology: General* 144.1 (2015), pp. 114–126. ISSN: 0096-3445. DOI: 10.1037/xge0000033.

[5] R. B. Fetter. "Diagnosis Related Groups: Understanding Hospital Performance". In: *Interfaces* 21.1 (1991), pp. 6–26. ISSN: 1526-551X. DOI: 10.1287/inte.21.1.6.

[6] R. B. Fetter, Y. Shin, J. L. Freeman, R. F. Averill, and J. D. Thompson. "Case Mix Definition by Diagnosis-Related Groups". In: *Medical Care* 18.2 (1980), pp. i–53. ISSN: 00257079. URL: http://www.jstor.org/stable/3764138 (visited on 10/02/2023).

[7] J. González, J.-C. Ferrer, A. Cataldo, and L. Rojas. "A proactive transfer policy for critical patient flow management". In: *Health Care Management Science* 22.2 (2018), pp. 287–303. DOI: 10.1007/s10729-018-9437-7.

[8] L. Green. "Capacity Planning and Management in Hospitals". In: *Operations Research and Health Care*. Springer US, 2005, pp. 15–41. ISBN: 9781402080661. DOI: 10.1007/1-4020-8066-2_2.

[9] Gurobi Optimization. *Gurobi Machine Learning documentation*. [Accessed 18-10-2023]. 2023. URL: https://gurobi-machinelearning.readthedocs.io/en/stable/.

[10] P. Humphreys et al. "An Overview of Hospital Capacity Planning and Optimisation". In: *Healthcare* 10.5 (2022), p. 826. ISSN: 2227-9032. DOI: 10.3390/healthcare10050826.

[11] Instituto de Sistemas Complejos de Ingeniería. *Regulación de flujo de pacientes*. [Accessed 12-12-2023]. 2020. URL: https://isci.cl/wp-content/uploads/2020/04/Reporte_Regulaci%C3%B3n-de-flujo-de-pacientes-ISCI_VMarianov-2.pdf.

[12] A. Madeira, V. Moutinho, and J. A. Fuinhas. "Does waiting times decrease or increase operational costs in short and long-term? Evidence from Portuguese public hospitals". In: *The European Journal of Health Economics* 22.8 (2021), pp. 1195–1216. ISSN: 1618-7601. DOI: 10.1007/s10198-021-01331-y.

[13] D. Maragno, H. Wiberg, D. Bertsimas, Ş. İ. Birbil, D. den Hertog, and A. O. Fajemisin. "Mixed-Integer Optimization with Constraint Learning". In: *Operations Research* (2023). ISSN: 1526-5463. DOI: 10.1287/opre.2021.0707.

[14] J. T. Marquinez, A. Sauré, A. Cataldo, and J.-C. Ferrer. "Identifying proactive ICU patient admission, transfer and diversion policies in a public-private hospital network". In: *European Journal of Operational Research* 295.1 (2021), pp. 306–320. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.02.045.

[15] D. A. Martinez et al. "Prolonged wait time is associated with increased mortality for Chilean waiting list patients with non-prioritized conditions". In: *BMC Public Health* 19.1 (2019). ISSN: 1471-2458. DOI: 10.1186/s12889-019-6526-6.

[16] D. Min and Y. Yih. "Scheduling elective surgery under uncertainty and downstream capacity constraints". In: *European Journal of Operational Research* 206.3 (2010), pp. 642–652. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.03.014.

[17] Ministerio de Salud de Chile. *Glosa 06 - Lista de Espera No Ges y Garantías de Oportunidad GES Retrasadas*. [Accessed 12-12-2023]. 2023. URL: https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2021/05/Ord.-331-Glosa-06-IV-Trim-2022.pdf.

[18] National Guideline Centre - UK. *Emergency and Acute Medical Care in Over 16s: Service Delivery and Organisation*. NICE Guideline 94. [Accessed 10-03-2024]. London: National Institute for Health and Care Excellence (NICE), 2018. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK564911/.

[19] OECD. *Health at a Glance 2023: OECD Indicators*. OECD, 2023. ISBN: 9789264777675. DOI: 10.1787/7a7afb35-en.

[20] P. K. Plunkett, D. G. Byrne, T. Breslin, K. Bennett, and B. Silke. "Increasing wait times predict increasing mortality for emergency medical admissions". In: *European Journal of Emergency Medicine* 18.4 (2011), pp. 192–196. ISSN: 0969-9546. DOI: 10.1097/mej.0b013e328344917e.

[21] W. Powell. *Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality*. en. 2nd ed. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley-Blackwell, 2011. DOI: 10.1002/9781118029176.

[22] W. Powell. "Perspectives of approximate dynamic programming". In: *Annals of Operations Research* 241.1–2 (2012), pp. 319–356. ISSN: 1572-9338. DOI: 10.1007/s10479-012-1077-6.

[23] M. Samudra, C. Van Riet, E. Demeulemeester, B. Cardoen, N. Vansteenkiste, and F. E. Rademakers. "Scheduling operating rooms: achievements, challenges and pitfalls". In: *Journal of Scheduling* 19.5 (2016), pp. 493–525. ISSN: 1099-1425. DOI: 10.1007/s10951-016-0489-6.

[24] J. Seidel, P. Whiting, and D. Edbrooke. “The costs of intensive care”. In: *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care amp; Pain* 6.4 (2006), pp. 160–163. ISSN: 1743-1816. DOI: 10.1093/bjaceaccp/mkl030.

[25] B. C. Sun et al. “Effect of Emergency Department Crowding on Outcomes of Admitted Patients”. In: *Annals of Emergency Medicine* 61.6 (2013), 605–611.e6. ISSN: 0196-0644. DOI: 10.1016/j.annemergmed.2012.10.026.

[26] Sutton and Barto. *Reinforcement Learning*. 2nd ed. Adaptive Computation and Machine Learning series. Cambridge, MA: Bradford Books, 2018.

[27] S. S. Tan et al. “Direct Cost Analysis of Intensive Care Unit Stay in Four European Countries: Applying a Standardized Costing Methodology”. In: *Value in Health* 15.1 (2012), pp. 81–86. ISSN: 1098-3015. DOI: 10.1016/j.jval.2011.09.007.

[28] V. Tiwari and H. S. Heese. “Specialization and competition in healthcare delivery networks”. In: *Health Care Management Science* 12.3 (2009), pp. 306–324. ISSN: 1572-9389. DOI: 10.1007/s10729-008-9096-1.

[29] V.-A. Truong. “Optimal Advance Scheduling”. In: *Management Science* 61.7 (2015), pp. 1584–1597. ISSN: 1526-5501. DOI: 10.1287/mnsc.2014.2067.

[30] United Nations. *The 17 goals — sustainable development*. [Accessed 12-12-2023]. 2020. URL: https://sdgs.un.org/goals.

[31] C. Van Riet and E. Demeulemeester. “Trade-offs in operating room planning for electives and emergencies: A review”. In: *Operations Research for Health Care* 7 (2015), pp. 52–69. ISSN: 2211-6923. DOI: 10.1016/j.orhc.2015.05.005.

[32] C. J. C. H. Watkins and P. Dayan. “Q-learning”. In: *Machine Learning* 8.3–4 (1992), pp. 279–292. ISSN: 1573-0565. DOI: 10.1007/bf00992698.

[33] C. Wendt. “Mapping European healthcare systems: a comparative analysis of financing, service provision and access to healthcare”. en. In: *J. Eur. Soc. Policy* 19.5 (2009), pp. 432–445. DOI: https://doi.org/10.1177/09589287093442.

[34] M. Zapata. “Importancia del sistema GRD para alcanzar la eficiencia hospitalaria”. In: *Revista Médica Clínica Las Condes* 29.3 (2018). Tema central: Enfermería, pp. 347–352. ISSN: 0716-8640. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2018.04.010.

[35] J. Zhang, M. Dridi, and A. E. Moudni. “An approximate dynamic programming approach to the admission control of elective patients”. In: *Computers &amp Operations Research* 132 (2021), p. 105259. DOI: 10.1016/j.cor.2021.105259.

[36] X. Zhang, S. Barnes, B. Golden, M. Myers, and P. Smith. “Lognormal-based mixture models for robust fitting of hospital length of stay distributions”. In: *Operations Research for Health Care* 22 (2019), p. 100184. ISSN: 2211-6923. DOI: 10.1016/j.orhc.2019.04.002.

[37] X. Zhang, M. E. Dupre, L. Qiu, W. Zhou, Y. Zhao, and D. Gu. “Urban-rural differences in the association between access to healthcare and health outcomes among older adults in China”. en. In: *BMC Geriatr.* 17.1 (2017), p. 151. DOI: 10.1371/journal.pone.0240194.

[38] S. Zhu, W. Fan, S. Yang, J. Pei, and P. M. Pardalos. “Operating room planning and surgical case scheduling: a review of literature”. In: *Journal of Combinatorial Optimization* 37.3 (2018), pp. 757–805. ISSN: 1573-2886. DOI: 10.1007/s10878-018-0322-6.

From Efficiency to Safety: A Simulation-based Framework for Evaluating Empty-Container Terminal Layouts

Cristóbal Vera-Carrasco
Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo
Concepción, Chile
crisverac@udd.cl

Sebastián Muñoz-Herrera
Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo
Concepción, Chile
semunoz@udd.cl

Cristian D. Palma
Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo
Concepción, Chile
cristianpalma@udd.cl

***Abstract*—**The design of empty container depot (ECD) significantly impacts the efficiency of the maritime terminal, yet traditional evaluation approaches assess limited operational factors, restricting comprehensive performance optimization. This study develops an integrated discrete event simulation (DES) framework that simultaneously evaluates lifting equipment utilization, truck turnaround times, and potential collisions to support terminal decision-making. This study combines operational efficiency metrics with safety analytics for non-automated ECDs using Top Lifters and Reach Stackers. In addition, a regression analysis examines the effect of efficiency metrics on safety risk. A case study at a Chilean multipurpose terminal reveals performance trade-offs between indicators under different operational scenarios, identifying substantial efficiency disparities between dry and refrigerated container operations. An analysis of four distinct collision zones with varying historical risk profiles showed that the gate area had the highest potential collisions and a strong regression correlation with efficiency metrics. Similar models showed a poor fit in other conflict zones, evidencing the need for dedicated safety indicators that complement traditional measures. This integrated approach quantifies interdependencies between safety and efficiency metrics, helping terminal managers optimize layouts, expose traditional metric limitations, and reduce safety risks in space-constrained maritime terminals.

Keywords—Maritime Terminal, Truck Turnaround Time, Equipment Productivity, Congestion, Yard Layout, Safety, Vehicles Collision, Performance Indicators, Simulation

Programación de la recolección de residuos reciclables basado en Ruteo Vehicular con Múltiples Productos y Múltiples Periodos

Valentina Vilches Carrillo
Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Campus Miraflores
Universidad Austral de Chile
Valdivia, Chile
valentina.vilches01@alumnos.uach.cl

Jusbeth Zambrano Suárez
Instituto de Ingeniería Industrial y Sistemas, Campus Miraflores
Universidad Austral de Chile
Valdivia, Chile
jusbeth.zambrano@uach.cl

I. Resumen

En Chile, en 2023 se generaron 19,6 millones de toneladas de residuos, un aumento del 12% en cinco años, mientras que el reciclaje alcanzó solo un 10% [1]. Con este contexto, se propone una herramienta para optimizar las rutas de recolección de residuos reciclables y mejorar el nivel de servicio. Se desarrollaron dos modelos en Python: uno de predicción del nivel de llenado de los contenedores y otro de ruteo vehicular [2] que considera múltiples productos [3], múltiples periodos [4] y la formulación Miller – Tucker – Zemlin para eliminar sub-tours [5] [6]. Se utilizan datos reales provenientes de una aplicación móvil creada en AppSheet. Según los niveles de llenado pronosticados por el modelo de predicción, el modelo de ruteo organiza las rutas de vaciado de los contenedores más críticos. El componente de predicción reacciona en tiempo real, previniendo la saturación de los contenedores, evitando contaminación visual y ambiental, y los viajes innecesarios. El modelo de ruteo minimiza la distancia recorrida, impactando los costos logísticos y la huella ambiental del proceso. Debido a su complejidad, los tiempos de cálculo son altos, alrededor de una hora para 7 puntos de recolección, 2 productos y 2 periodos. Para solucionar esto se implementan medidas que limitan el espacio de búsqueda de la solución, llegando a resolver instancias con 18 puntos de recolección, 2 productos y 3 periodos en menos de dos minutos. Este procedimiento estructurado, que integra datos reales, matemática y tecnología, espera aumentar la eficiencia logística y la capacidad de recolección de residuos reciclables.

Referencias

[1] Instituto Nacional de Estadísticas, *Estadísticas del Medio Ambiente, Informe Anual 2024*, 2024.

[2] G. B. Dantzing and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem", *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80-91, 1959. [Online]. Available: https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80

[3] W. Gu, C. Archetti, D. Cattaruzza, M. Ogier, F. Semet, and M. G. Seranza, "Vehicle routing problems with multiple commodities: A survey", *European Journal of Operatioal Research*, vol. 317, no. 1, pp. 1-15, 2024. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.11.032

[4] M. Frank, "A review on emerging variants of the multi-period vehicle routing problem", *SSRN*, 2022. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4095035

[5] C. Miller, A. Tucker, and R. Zemlin, "Integer programming formulation of traveling salesman problem", *J. ACM*, vol. 7, no. 4, pp. 326-329, 1960. [Online]. Available: http://doi.org/10.1145/321043.321046

[6] I. Kara, G. Laporte, and T. Bektas, "A note on the lifted Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints for the capacitated vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, vol. 158, no. 3, pp. 793-795, 2004. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00377-1

Sistema de apoyo a la toma de decisiones para la planificación agregada, desagregada y requerimiento de insumos para la producción en CAPEL

1st Sofía Galleguillos
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
sofia.galleguillos@alumnos.ucn.cl

2nd Pedro Muñoz
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
pedro.munoz@alumnos.ucn.cl

3rd Katterine Tapia
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
katterine.tapia@alumnos.ucn.cl

4th Dr. Carlos Monardes
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
cmonardes@ucn.cl

***Abstract*—CAPEL (Cooperativa Agrícola Pisquera Elqui limitada) enfrenta desafíos en la planificación de la producción debido a procesos manuales basados en Excel, donde se centraliza el conocimiento en el jefe del área. Este proyecto propone una solución tecnológica integrada mediante Python, donde se ejecutan los modelos de optimización y Power Platform, donde se utilizan sus aplicaciones de Power Apps para la interfaz, como también Power Automate para tareas de automatización. Los resultados muestran reducciones del 14% en tiempos de setup en la línea principal de producción (Línea 1) y 13,5% en la segunda línea principal (Línea 3), además de aproximadamente un 30% menos en tiempos de planificación. El sistema mejora la estandarización, reduce errores y facilita la toma de decisiones.**

***Index Terms*—Planificación de la producción, industria pisquera, optimización, power platform, automatización**

I. Introducción

CAPEL, cooperativa chilena fundada en 1938, compuesta por más de 1.000 agricultores de las regiones de Atacama y Coquimbo. Se dedica a la producción y comercialización de pisco, con una participación de mercado chileno del 38%-40%. Además, diversifica su portafolio con vinos, cócteles y ron. Su modelo de negocio se enfoca en distribuir sus productos a través de Andina y Embonor, ambas distribuidoras de Coca-Cola. Su planta principal es Vicuña la cual cuenta con 4 líneas de producción. Dentro del área de planificación de la producción, la planificación agregada, desagregada y requerimiento de insumos se gestiona mediante hojas de Excel personalizadas, dependientes del subgerente de producción. Esto genera ineficiencias operativas en sus líneas principales (OEE del 45% vs 60% deseado, línea 1)

Los objetivos planteados son:

Objetivo general: Optimizar el sistema de requerimientos de insumos, tanto enológicos como secos, basado en la planificación diaria y la del año móvil de producción.

Objetivos específicos:

- Analizar la situación actual del sistema y determinar oportunidades de mejora.
- Diseñar un modelo automatizado para la planificación diaria de productos.
- Establecer un sistema que visualice el requerimiento óptimo de materiales.
- Implementar un sistema de soporte a decisiones flexible para la planificación de la producción.

II. Marco Teórico

A. Modelos de optimización

- Programación por metas (GP): minimiza desviaciones de objetivos jerárquicos (inventario, setup).
- Gestión de inventarios: combina MRP y JIT para insumos enológicos/secos.

B. Herramientas

- Pyomo: Framework de optimización en Python para problemas lineales/enteros.
- CBC: Solver de programación entera mixta.
- Power Platform: interfaz de bajo código (Power Apps) y automatización (Power Automate).

C. Brecha investigativa

El desafío de integrar la planificación de la producción y la adquisición de insumos ha sido ampliamente estudiado en la literatura mediante sistemas de Planificación de Requerimientos de Materiales (MRP) y principios de manufactura

esbelta como Justo a Tiempo (JIT), mientras que la Programación por Metas (GP) se ha establecido como técnica robusta para problemas de planificación de producción multiobjetivo, donde típicamente se incorporan funciones objetivo basadas en minimización de costos de producción, inventario y setup. Sin embargo, existe un vacío de investigación en la integración práctica de estas técnicas con plataformas de bajo código para empresas del sector agroindustrial que operen bajo restricciones de información limitada. A diferencia de la mayoría de estudios reportados, nuestros modelos no incorporan funciones objetivo basadas en costos debido a que la empresa no proporcionó esta información, por ser confidencial, lo que impuso el desafío de diseñar un modelo que optimizara mediante minimización de holguras, desviaciones y tiempos de setup en lugar de costos directos. Esta aproximación representa una contribución metodológica relevante para entornos productivos con restricciones informativas, demostrando cómo los fundamentos teóricos de GP, gestión de inventarios y MRP pueden adaptarse y combinarse sinérgicamente con plataformas de bajo código desplegadas en arquitecturas cloud para resolver problemas complejos del mundo real en la industria de alimentos y bebidas, incluso bajo limitaciones de datos.

III. Metodología

A. Diseño del sistema

- Backend: modelos en Python para:
  - Planificación de productos (horizonte de 2 meses).
  - Requerimientos de insumos (año móvil).
- Integración: SharePoint como base de datos central.
- Frontend: Power Apps para visualización/edición.

B. Modelos Matemáticos

1) Modelo Planificación Productos Terminados: Este modelo tiene como objetivo optimizar la planificación de la producción mensual de los productos terminados de la planta, distribuyendo la fabricación de manera eficiente a lo largo de los días del mes. A través de este enfoque, se busca cumplir con múltiples restricciones operativas, necesidades de inventario y prioridades de producción, permitiendo que la planificación sea precisa y eficaz. El modelo responde a preguntas clave como:

- ¿Cuánto debe fabricarse de cada producto?
- ¿En qué día debe producirse?
- ¿Cuáles productos conviene fabricar juntos?
- ¿Es posible alcanzar las metas de producción dentro de las capacidades existentes?

Conjuntos

- I: Conjunto de productos.
- T: Conjunto de días.
- M: Conjunto de meses.
- F: Conjunto de segmentos (familias de productos).
- K_f: Conjunto de productos que pertenecen al segmento f, $K_f = \{i \in I \mid i \in f\}$

Parámetros

- HT: Horas máximas de trabajo por día.
- DT: Días trabajados por mes.
- C_i: Transparencia del producto i (0 = color, 1 = transparente).
- CB: Capacidad de la bodega.
- CC_i: Capacidad de botella del producto i.
- CP_i: Cantidad de productos por pallet para el producto i.
- $D_{i,m}$: Demanda mensual del producto i en el mes m.
- G_i: Grado alcohólico del producto i.
- $TS_{i,j}$: Tiempo de set-up entre productos i y j.
- TP_i: Tasa de producción del producto i.
- S_{i0}: Inventario inicial del producto i.
- LP_i: Línea de producción asignada al producto i.
- $SB_{i,j}$: Grado de similitud entre los productos i y j.
- HO_i: Holgura del producto i.
- $PM_{i,j}$: Puntaje mínimo requerido de similitud entre los productos i y j.
- LO_i: Lote óptimo del producto i.
- MA_i: Marca del producto i.

Variables

- $X_{i,t}$: Cantidad de productos i a fabricar en el periodo t.
- $S_{i,m}$: Inventario del producto i al final del mes m.
- $PT_{i,m}$: Cantidad de pallets a utilizar por el producto i en el mes m.
- $Z_{i,t}$: Variable binaria que indica si el producto i se va a fabricar en el periodo t.
- $VS_{i,j,t}$: Variable de holgura para las similitudes entre los productos i y j en el periodo t.
- SV_i: Variable de holgura para los productos faltantes en el inventario de seguridad del producto i.
- $MU_{i,t}$: Múltiplo del lote óptimo del producto i que se fabrica en el periodo t.
- $DL_{i,t}$: Faltante para cubrir el lote óptimo que se fabricó del producto i en el periodo t.
- $EL_{i,t}$: Exceso sobre el lote óptimo que se fabricó del producto i en el periodo t.

Restricciones

$$\sum_{i \in I} \frac{S_{i,m}}{CP_i} \leq CB, \forall m \in M \quad (1)$$

$$S_{i,0} + \sum_{t \in T} X_{i,t} \geq D_{i,1} + D_{i,2} - SV_i, \forall i \in I_{\text{dem}} \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T} X_{i,t} \leq 0, \forall i \in I_{\text{sin}} \cup I_{\text{suf}} \quad (3)$$

$$S_{i,1} = S_{i,0} + \sum_{t \in T} X_{i,t} - D_{i,1}, \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i \in I: \\ LP_i = l}} \frac{X_{i,t}}{TP_i} + \sum_{\substack{i,j \in I: \\ LP_i = LP_j = l}} TS_{i,j} \leq HT, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^{\tau(HO_i)} X_{i,t} \geq 0.25 \cdot D_{i,1}, \forall i \in I : HO_i \leq 22 \quad (6)$$

$$SB_{i,j} \cdot (Z_{i,t} + Z_{j,t}) + VS_{i,j,t} \geq PM \cdot (Z_{i,t} + Z_{j,t}), \quad \forall l \in L,\ \forall t \in T,\ \forall i,j \in I : LP_i = LP_j = l \tag{7}$$

$$X_{i,t} = MU_{i,t} \cdot LO_i + DL_{i,t} + EL_{i,t}, \forall i \in I, \forall t \in T \tag{8}$$

$$DL_{i,t} \leq 0.5 \cdot LO_i, \forall i \in I, \forall t \in T \tag{9}$$

$$EL_{i,t} \leq 0.2 \cdot LO_i, \forall i \in I, \forall t \in T \tag{10}$$

$$X_{i,t} \leq D_{i,1} + D_{i,2} - S_{i,0} + LO_i, \forall i \in I, \forall t \in T \tag{11}$$

Función Objetivo

El modelo implementa un enfoque de programación por metas para resolver problemas con múltiples objetivos jerárquicos. Una vez alcanzado el óptimo de una meta, se añaden restricciones para garantizar que los valores obtenidos en la meta anterior no se deterioren al optimizar la siguiente.

La primera función objetivo del modelo tiene como propósito minimizar las holguras de inventario de seguridad. Esta holgura representa la cantidad que el modelo no puede garantizar como inventario al final del período para cubrir las demandas proyectadas del siguiente mes. Su inclusión permite que el modelo busque cumplir con la política de inventario de seguridad en la mayor medida posible.

a) Primera Función Objetivo: Minimizar las Holguras de Inventario de Seguridad:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i \in I} SV_i \tag{12}$$

Una vez obtenida la solución óptima (SV^*), se agrega la siguiente restricción para preservar este valor durante la optimización de las siguientes metas

Restricción para Preservar la Holgura Óptima

$$\sum_{i \in I} SV_i \leq SV^* \tag{13}$$

b) Segunda Función Objetivo: Minimizar Excesos y Desviaciones del Lote Optimo:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (DL_{i,t} + EL_{i,t}) \tag{14}$$

La segunda función objetivo busca minimizar la desviación y el exceso respecto a los múltiplos del lote óptimo para cada producto. Esto significa que el modelo intenta que las cantidades producidas sean lo más cercanas posibles a los múltiplos predefinidos del tamaño de lote óptimo.

2) Modelo Requerimiento de Insumos: El modelo tiene como objetivo minimizar las desviaciones entre los insumos disponibles y los requeridos para cumplir con la planificación de producción, considerando las proyecciones de venta, el tiempo de entrega (lead time) de cada insumo, el stock inicial y las cantidades de insumos pedidas. Al minimizar estas brechas, se busca evitar quiebres de stock y acumulaciones excesivas, proporcionando recomendaciones precisas sobre el día y la cantidad de insumos a solicitar para garantizar el equilibrio en las bodegas de almacenaje. Además, el modelo estima el requerimiento de insumos tanto para la planificación mensual como para las proyecciones de ventas a lo largo de un año móvil.

Conjuntos

- I: Conjunto de insumos, $i \in I$.
- P: Conjunto de productos, $p \in P$.
- T: Conjunto de días, $t \in T$.
- M: Conjunto de meses, $m \in M$.
- F: Conjunto de segmentos (familias de productos), $f \in F$.
- K_f: Conjunto de productos que pertenecen al segmento f, $K_f = \{i \in I \mid i \in f\}$.

Parámetros

- $MPC_{i,p}$: Cantidad de insumo i requerida por unidad del producto p.
- LT_i: Lead time para el insumo i.
- CD_i: Tiempo de caducidad del insumo i.
- UP_i: Cantidad de unidades del insumo i por pallet.
- ω_i: Factor de ponderación para el insumo i.
- $X_{p,t}$: Cantidad planificada de producción del producto p en el periodo t.
- $Q_{i,t-LT_i}$: Cantidad de insumo que fue solicitada LT_i períodos atrás y que llega en el período de producción t.
- $QM_{i,t}$: Cantidad máxima de insumo i que se puede pedir en el día t.
- $PR_{p,m}$: Proyecciones de venta del producto p para el mes m.
- $S_{i,0}$: Stock actual en bodega de almacenamiento del insumo i.

Variables

- $S_{i,t}$: Inventario del insumo i al final del día t.
- $S_{i,m}$: Inventario del insumo i al final del mes m.
- $Q_{i,t}$: Cantidad de insumo i a pedir en el día t.
- $HP_{i,t}$: Holgura por falta de inventario de insumo i en el día t.
- $HN_{i,t}$: Holgura por exceso de inventario de insumo i en el día t.
- $ZQ_{i,t}$: Número de lotes de insumo i a pedir en el día t que sea un múltiplo de las unidades por pallet.

Restricciones

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + Q_{i,t-LT_i} - \sum_{p \in P} (MPC_{i,p} \cdot X_{p,t}) + HP_{i,t} - HN_{i,t}, \forall i \in I,\ \forall t \in T \tag{15}$$

$$S_{i,m} = \sum_{t \in T_m} S_{i,t}, \forall i \in I, \forall m \in M \tag{16}$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k=t+LT_i}^{t+2LT_i-1} MPC_{i,p} \cdot X_{p,k} \leq Q_{i,t} + \sum_{k=t+LT_i}^{t+2LT_i-1} S_{i,k}, \quad \forall i \in I,\ \forall t \in T \tag{17}$$

$$\sum_{i \in I} (MPC_{i,p} \cdot X_{p,t}) \leq S_{i,t-1} + Q_{i,t-LT_i}, \quad \forall p \in P,\ \forall t \in T \tag{18}$$

$$QM_{i,t} = \sum_{p \in P} \sum_{\tau=t}^{t+2LT_i} MPC_{i,p} \cdot X_{p,\tau}, \quad \forall i \in I,\ \forall t \in T \tag{19}$$

$$ZQ_{i,t} \leq \frac{QM_{i,t}}{UP_i}, \forall i \in I, \forall t \in T \tag{20}$$

$$Q_{i,t} = UP_i \cdot ZQ_{i,t}, \forall i \in I, \forall t \in T \tag{21}$$

Función objetivo

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in I} \frac{\text{CD}_i}{LT_i} \cdot (HP_{i,t} + HN_{i,t}) \tag{22}$$

El modelo tiene como objetivo minimizar la brecha entre los insumos faltantes y sobrantes en el inventario. Esta reducción se logra a través de la minimización de las holguras positiva y negativa, ya que son las variables que absorben las desviaciones entre la disponibilidad de insumos y los requerimientos de producción. Además, esta disminución de holguras está condicionada por un factor de prioridad, evitando costos asociados a quiebres de stock o almacenamiento innecesario.

3) Justificación de la arquitectura de los modelos secuenciales: La decisión de implementar dos modelos secuenciales en lugar de uno monolítico está impulsada principalmente en la idea de un modelo monolítico que optimice simultáneamente la programación de la producción y la adquisición de insumos es complejo y computacionalmente costoso, pudiendo volverse intratable para instancias del mundo real con cientos de productos, insumos y períodos de tiempo diarios, como es en caso de CAPEL. La descomposición del problema en dos etapas mantiene la viabilidad computacional y permite el uso de solucionadores eficientes en un marco de tiempo razonable. Además esta arquitectura ofrece una mayor flexibilidad frente a cambios, debido a su menor tiempo de computación.

IV. Resultados

Sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS): Modelos de optimización

Horizonte de evaluación: 6 meses

Optimización de los tiempos de set-up en las líneas de producción clave.

Comparativa entre planificaciones reales vs modelo de optimización

TABLE I
Resultados de optimización en líneas de producción

Línea	% de disminución	Ahorro operativo
L1	14,02%	$3.085.510
L3	13,51%	$912.250

- Modelo de requerimiento de insumos: reducción de más de **30%** de los tiempos de planificación.
- Mejora del cumplimiento de inventario en promedio de un **3,12%**.
- Reducción de planificación de tiempo de productos de 15 a **5 minutos**.

Conclusión

La solución integrada demuestra:

- **Reducción de Dependencia**: Eliminación de procesos manuales y centralizados.
- **Integración de Herramientas en la Nube**: Implementación exitosa de soluciones basadas en Power Platform.
- **Estandarización de Procesos**
- **Eficiencia en la Toma de Decisiones**: Reducción de tiempos de análisis y respuesta. Planificación de insumos de 3 horas a 30 minutos.
- **Escalabilidad Futura**

Trabajo futuro: Incorporar metaheurísticas y ampliar la planificación agregada anual.

References

[1] Alharbi, A. A., & Qureshi, R. (2018). The proposed L-Scrumhan methodology to improve the efficiency of agile software development. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*, 10(3), 23-35. https://doi.org/10.5815/ijieeb.2018.03.03.

[2] Hall, L., & Gordon, A. (1998). A virtual learning environment for city relationship modelling. *Proceedings of the 29th SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, 344-348. https://doi.org/10.1145/274790.274327.

[3] Hillier, F. S. (2021). *Introduction to Operations Research* (11th ed.). McGraw-Hill Education.

[4] Salvaj, J. (2017). *Kanban y Scrumban*. Proyecto de Grado, Instituto Universitario Aeronáutico. Recuperado de https://repo.iua.edu.ar/bitstream/123456789/8801/1/Proyecto%20de%20Grado%20-%20Kanban%20y%20Scrumban%20-%20Javier%20Salvaj.pdf

[5] Schröter, C., Kruse, F., & Gómez, J. M. (2021). A systematic literature review on applying CRISP-DM process model. *Procedia Computer Science*, 181, 526-534. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.199.

[6] Ander, F. (s.f.). Optimización en Python con Pyomo. Recuperado de https://anderfernandez.com/blog/optimizacion-en-python-con-pyomo/

[7] Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge University Press.

[8] Charnes, A., & Cooper, W. W. (1977). Goal programming and multiple objective optimizations. *European Journal of Operational Research*, 1(1), 39-54.

[9] Ignizio, J. P. (1976). *Goal programming and extensions*. Lexington Books.

[10] Pressman, R. S. (2010). *Ingeniería del software: un enfoque práctico* (7th ed.). McGraw-Hill.

[11] Pyomo Documentation. (2023). CBC Solver. Recuperado de https://pyomo.readthedocs.io/en/6.6.2/library$_reference/appsi/appsi.solvers.cbc.ht$

[12] Scielo Colombia. (2010). Programación por Metas. Recuperado de https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702010000100009script=sci$_arttext$

[13] Scielo. (s.f.). Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones. Recuperado de https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v29s2/0379-3982-tem-29-s2-16.pdf

[14] Sommerville, I. (2016). *Ingeniería de software* (10th ed.). Pearson Educación.

[15] Sprague, R. H., Jr., & Carlson, E. D. (1982). *Building effective decision support systems*. Prentice-Hall, Inc.

[16] Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling* (3rd ed.). John Wiley & Sons. ISBN: 978-0471119470.

[17] Nahmias, S., & Cheng, Y. (2009). *Production and Operations Analysis* (6th ed.). McGraw-Hill Education. ISBN: 978-0071263702.

Session N°6 – Track N°2

OR Applications in Healthcare

Chair: Cabrera-Guerrero, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
Place: G6-054
Time: 10:30 – 11:45

Agendamiento de Sesiones de Quimioterapia Considerando la No Aparición de Pacientes

Time: 10:30 – 10:45
Authors:

- Lozano, F. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Cataldo, A. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Rey, P. *(Universidad Tecnológica Metropolitana)*
- Sauré, A. *(University of Ottawa)*
- Sánchez, C. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Planificación Robusta de Rutas en Hospitalización Domiciliaria con Equipos Interdisciplinarios

Time: 10:50 – 11:05
Authors:

- San Martín-González, D. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Carrasco, R. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Teleconsultation Trends in Operations Research: A Bibliometric Study

Time: 11:10 – 11:25
Authors:

- Komasi, H. *(Universidad Católica del Norte)*
- Ramírez-Correa, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tan, F. *(Auckland University of Technology)*

Modelo MAUT-KBP para la Evaluación de Planes IMRT en Cáncer de Próstata: Integración de Teoría Multicriterio y Planificación Basada en Conocimiento

Time: 11:30 – 11:45
Authors:

- Tobon-Castro, L. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Cabrera-Guerrero, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Moyano, M. *(Universidad Católica del Norte)*

Agendamiento de sesiones de quimioterapia considerando la no aparición de pacientes

Francisco Lozano
Escuela de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
folozano@uc.cl

Alejandro Cataldo
Instituto de Ingeniería Matemática y Computacional
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
aecatald@uc.cl

Pablo A. Rey
Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica Metropolitana
Santiago, Chile
prey@utem.cl

Antoine Sauré
Telfer School of Management
University of Ottawa
Ottawa, Canadá
asaure@uottawa.ca

César Sánchez
Escuela de Medicina
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
cgsanche@uc.cl

El agendamiento inter-día de sesiones de quimioterapia es un problema complejo, cuya resolucion afecta directamente el funcionamiento de sistemas de salud en todo el mundo. Restricciones como el número de sesiones, módulos de atención y tiempos de descanso entre sesiones hacen de este un problema multi-objetivo, cuya solución permite el procesamiento de demanda sobre horizontes de tiempo definido.

Modelamos el problema mediante un proceso de programación en tres pasos. Primero, recuperamos los recursos futuros vinculados a tratamientos interrumpidos por la no aparición de pacientes. Segundo, identificamos a los pacientes con oportunidad de ver sus tiempos de espera disminuidos. Tercero, programamos sesiones de quimioterapia proactivamente a través de una política basada en la resolución de un proceso de decisión markoviano mediante programación dinámica aproximada. Este enfoque capitaliza sobre características propias del problema, minimizando así los costos operativos descontados y reduciendo los tiempos de espera medios al reasignar efectivamente recursos que, de otro modo, se perderían. Utilizando datos de la Red de Salud UC CHRISTUS, presentamos un caso de estudio que demuestra el impacto de las no apariciones en los sistemas de salud bajo nuestro proceso de programación propuesto.

Nuestro enfoque conduce a mejoras en múltiples indicadores asociados a la excelencia operacional de los centros ambulatorios de quimioterapia, así como el nivel de servicio percibido por los pacientes. Particularmente, el enfoque propuesto logra una reducción de costos operacionales descontados del 22,3%, acompañado de una reducción del 32,6% en tiempos de espera medios con respecto a algoritmos de programación previamente planteados. Los resultados permiten concluir que existen múltiples beneficios asociados a la incorporación del fenómeno de las no apariciones a la resolución del problema, y que el proceso planteado permite, sin perjuicio de los costos operativos, mejorar el nivel de servicio.

Planificación robusta de rutas en hospitalización domiciliaria con equipos interdisciplinarios

Diego Ernesto San Martín González*, Rodrigo A. Carrasco*†
*Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Pontificia Universidad Católica de Chile
†Instituto de Ingeniería Matemática y Computacional, Pontificia Universidad Católica de Chile

***Resumen*—La hospitalización domiciliaria (HD) se ha consolidado como una alternativa viable para optimizar el uso de recursos hospitalarios, especialmente en sistemas públicos con capacidad limitada. En este trabajo proponemos un enfoque de optimización robusta para la planificación diaria de hospitalización domiciliaria que integra ruteo y asignación de personal clínico con preasignación de equipos interdisciplinarios. Nuestras contribuciones son: (i) una formulación robusta que incorpora incertidumbre empírica en tiempos de viaje y de atención a partir de trazas GPS; (ii) un esquema de preasignación que preserva las restricciones clínicas y reduce la complejidad computacional; y (iii) criterios operativos de bienestar laboral mediante términos de equidad de carga entre estamentos y uso de horas extra.**

Validamos el enfoque mediante un caso de estudio con datos del servicio de hospitalización domiciliaria del Hospital Eloísa Díaz de La Florida, en Santiago de Chile. La validación muestra factibilidad computacional y sugiere potencial para reducir la duración total de rutas, mejorar la cobertura efectiva y favorecer una distribución más equitativa de la carga laboral. Enfatizamos que el valor principal del trabajo está en el método y su integración *data-driven*, mientras que el hospital funciona como escenario de verificación externa.

***Index Terms*—Hospitalización Domiciliaria, Ruteo y Asignación, Incertidumbre Operacional, Logística en Salud Pública, Optimización Robusta.**

Diego San Martin: dsm@uc.cl, Rodrigo Carrasco: rcarrass@uc.cl

Teleconsultation Trends in Operations Research: A Bibliometric Study

Hossein Komasi
School of Engineering
Universidad Catolica del Norte
Coquimbo, Chile
hossein.komasi@ucn.cl

Patricio E. Ramírez-Correa
School of Engineering
Universidad Catolica del Norte
Coquimbo, Chile
patricio.ramirez@ucn.cl

Felix B. Tan
Faculty of Design & Creative Technologies Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand
felix.tan@aut.ac.nz

Abstract— ***The use of teleconsultation services has grown dramatically in recent decades due to the quick development of information and communication technologies, especially among medical professionals. Teleconsultation has been studied from a variety of angles and for a variety of reasons in a number of studies, with particular momentum in recent years. The goal of the current study is to investigate research trends in the field of teleconsultation, with a particular emphasis on operations research, through bibliometric analysis. This study is review-based and uses the Bibliometrix package in R for data analysis. The results show that while academic interest in teleconsultation from an operations research perspective has been steady over time, there has been a noticeable increase after 2000. Publication activity peaked between 2019 and 2024, driven largely by global health-related challenges. Additionally, despite their great significance, system optimization challenges-referred to as "basic themes"-have gotten relatively little attention from researchers, according to the thematic map. The map additionally emphasizes the existence of specialized and technical research in this area.***

Keywords—***Teleconsultation, Operations Research, Bibliometric Analysis.***

I. Introduction

In recent years, the adoption of teleconsultation by healthcare professionals has surged significantly, driven by rapid technological advancements and the growing demand for accessible health services[1], [2]. Teleconsultation plays a pivotal role in overcoming geographical and transportation barriers, contributing to substantial cost reductions and enhanced efficiency within healthcare systems. Nevertheless, the effective management and implementation of teleconsultation programs remain complex endeavors that require the application of rigorous optimization techniques and robust analytical methods[3], [4].Globally, the acceptance rate of teleconsultation varies widely, particularly between developed and developing nations [4]. These disparities stem from a combination of infrastructural, sociocultural, and economic factors-ranging from access to smart devices and high-speed internet, to public receptivity toward technology and trust in remote medical consultations [5], [6], [7], [8]. Overall, the global trend in teleconsultation usage is clearly on the rise across diverse segments of society. This growth is directly linked to the widespread expansion of internet access, where ongoing advancements in communication technologies-coupled with decreasing costs and rising public awareness-have further accelerated the adoption of these services[4], [9], [10], [11]. Among the various strategies proposed to support the successful implementation of teleconsultation, Operations Research (OR) methods offer practical solutions to a range of critical issues. By focusing on cost reduction, enhanced efficiency, and systemic improvement, these methods can significantly contribute to the expansion and success of teleconsultation initiatives across different societal sectors[12]. A number of studies have explored the optimization of teleconsultation services. For example, [13] focused on optimizing the scheduling of teleconsultation rooms to reduce patient travel, thereby promoting more environmentally sustainable healthcare delivery. Similarly, [14], through a narrative review, examined key performance indicators in telehealth by analyzing organizational documents and scholarly articles. Despite these valuable contributions, a comprehensive and structured review of research trends in this domain remains lacking. While each study sheds light on specific aspects of teleconsultation, there is a clear absence of a systematic bibliometric analysis that maps the evolution and research trajectories at the intersection of teleconsultation and Operations Research. This gap hinders the identification of research voids, emerging topics, and key stakeholders in the field. Despite these valuable contributions, a comprehensive and structured review of research trends in this domain remains lacking. While each study sheds light on specific aspects of teleconsultation, there is a clear absence of a systematic bibliometric analysis that maps the evolution and research trajectories at the intersection of teleconsultation and Operations Research. This gap hinders the identification of unexplored research areas, emerging topics, and key stakeholders in the field. In other words, understanding the evolution of teleconsultation-related publications that employ Operations Research approaches over time, the topics that have attracted the most scholarly attention, and the leading authors and countries in this area can serve as a strategic roadmap for researchers and policymakers involved in telehealth development. Consequently, this study aims to fill this void by conducting a bibliometric analysis of research trends in teleconsultation with a focus on Operations Research.

II. Research Methodology

This study employed a bibliometric analysis to investigate research trends in teleconsultation, specifically focusing on its intersection with operations research. Data were systematically extracted from the Web of Science Core Collection database using a precise and comprehensive search string. Following data collection, the bibliometric analysis was performed using the Bibliometrix R package and its graphical user interface, Biblioshiny, within the RStudio environment. These tools facilitated a variety of quantitative analyses, including examinations of annual publication trends, identification of the most prolific authors and institutions, co-authorship analysis, keyword clustering to uncover central and emerging themes, and mapping of collaboration networks. This systematic approach provided us with a comprehensive and objective overview of the structure and dynamics within this interdisciplinary research domain. Our Web of Science search, conducted on July 18, 2025, included the following keywords:

"TS= ((teleconsult* OR telehealth OR telemedicine) AND ("Operations Research" OR Optimization OR "Decision Making"))"

Acknowledgment :This work was funded by the Chilean Government, project ANID/FONDECYT Regular 1241852.

Result: 2,247 papers

The link to this search is as follows:

https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/678b4cdc-ba54-4f9e-8e83-7b6b795be2b4-016f5e066a/relevance/1

III. RESULTS

Next, we present the most relevant results of the analysis.

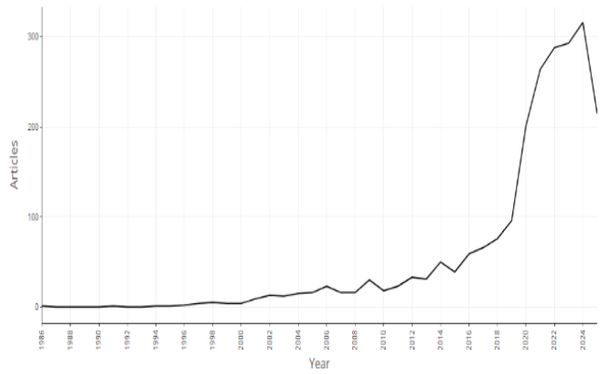


Fig.1: Annual scientific production

Fig 1 illustrates the publication trends within the domain of teleconsultation with a focus on operations research. As the graph clearly indicates, this field has experienced a notable surge in academic output over time. From 1986 until approximately 1999, the number of articles remained consistently low, almost negligible. A gradual, albeit modest, increase began in the early 2000s, with annual publications generally staying below 20 until around 2012. Between 2012 and 2019, a steady, albeit slow, upward trend emerged, with annual articles ranging from approximately 50 to 100.

However, a dramatic increase in scholarly production occurred from 2020 onwards, coinciding with the global COVID-19 pandemic, which likely accelerated both the adoption of and research interest in teleconsultation. The peak in annual scholarly output appears to be around 2022 or early 2023, with the number of articles surpassing 300. Subsequently, a noticeable decrease is observed in 2024, likely signaling a stabilization or slight reduction in the explosive growth seen during the pandemic.

Fig 2 presents a thematic map categorizing teleconsultation research trends within Operations Research into four main quadrants.

The “Motor Themes” quadrant highlights key topics like “care, telehealth, impact” and “outcomes, program, mortality,” showing a strong focus on teleconsultation benefits and outcome improvements. The cluster “time, acute ischemic-stroke, thrombolysis” underscores the critical importance of efficient time management in emergency treatments, directly linking to Operations Research’s goal to reduce costs and delays.

The “Basic Themes” quadrant includes foundational but underexplored topics such as “telemedicine, management, health-care” and “system optimization challenges.” Despite their importance, optimization issues have received limited attention, signaling a crucial research gap.

The “Niche Themes” and “Emerging or Declining Themes” quadrants contain specialized or evolving topics. For example, “segmentation” is a niche theme, while “algorithm, classification, prediction” represent emerging technical methodologies. The emergence of these topics reflects a growing interest in applying advanced computational methods to teleconsultation. These tools enhance decision-making, patient segmentation, and outcome forecasting, marking a shift toward data-driven approaches and opening new avenues for innovation and efficiency in teleconsultation systems.

Finally, the COVID-19 pandemic significantly boosted teleconsultation research, driving diverse approaches to improve these services.

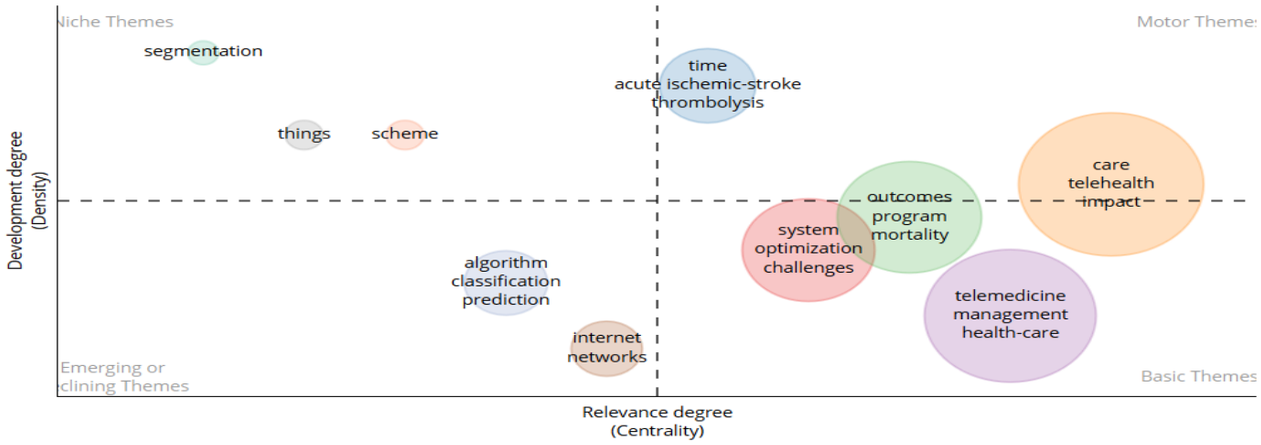


Fig.2: Thematic Map in teleconsultation with a focus on operations research

IV. DISCUSSION

The research findings unequivocally point to an unprecedented surge in research interest in teleconsultation, particularly at its intersection with operations research. The dramatic increase in the number of articles since 2020, peaking in 2022 and 2023, directly coincides with the onset of the COVID-19 pandemic. This sudden spike in scholarly output reflects the rapid adoption and urgent need for remote healthcare solutions, coupled with a growing recognition of operations research's significant potential to optimize these services under challenging circumstances. While various studies have explored the impact of different factors on teleconsultation adoption [15], [16], [17] and strategies for enhancing its performance, a notable research gap persists

concerning the improvement of its overall efficiency. Recent work [18] highlights the use of data science tools for patient segmentation, illustrating the rise of algorithmic and predictive approaches that complement optimization efforts.

Our results highlight the urgent need for ongoing investment in operations research to unlock teleconsultation's full potential post-pandemic. The frequent appearance of terms like "telemedicine," "management," and "care" reflects a broad focus on technical, managerial, and clinical aspects. Meanwhile, the prominence of "optimization," "system," and "decision-making" confirms the field's growing recognition of operations research as key to improving efficiency, resource allocation, and service quality in teleconsultation. The increasing significance of teleconsultation during the COVID-19 pandemic led to a notable surge in study on the topic. Since then, researchers have employed a range of techniques to put forth a variety of ideas meant to enhance the service. Many researches have emphasized the vital relevance of effective time management and its effectiveness in providing emergency treatments remotely, since one of the main goals of teleconsultation is to avoid travel and, as a result, reduce financial and time-related expenditures.

V. Conclusions

This study conducted a bibliometric analysis to identify research trends in teleconsultation, focusing on the role of operations research. Results reveal a growing interest in applying operations research as an interdisciplinary approach to address managerial and clinical challenges and improve remote healthcare delivery.

References

[1] A. Haleem, M. Javaid, R. P. Singh, and R. Suman, "Telemedicine for healthcare: Capabilities, features, barriers, and applications," *Sensors International*, vol. 2, p. 100117, 2021, doi: 10.1016/j.sintl.2021.100117.

[2] V. C. Ezeamii *et al.*, "Revolutionizing Healthcare: How Telemedicine Is Improving Patient Outcomes and Expanding Access to Care," *Cureus*, Jul. 2024, doi: 10.7759/cureus.63881.

[3] H. Ndwabe, A. Basu, and J. Mohammed, "Post pandemic analysis on comprehensive utilization of telehealth and telemedicine," *Clinical eHealth*, vol. 7, pp. 5–14, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.ceh.2023.12.002.

[4] P. A. Anawade, D. Sharma, and S. Gahane, "A Comprehensive Review on Exploring the Impact of Telemedicine on Healthcare Accessibility," *Cureus*, Mar. 2024, doi: 10.7759/cureus.55996.

[5] M. Haimi, "The tragic paradoxical effect of telemedicine on healthcare disparities- a time for redemption: a narrative review," *BMC Med Inform Decis Mak*, vol. 23, no. 1, p. 95, May 2023, doi: 10.1186/s12911-023-02194-4.

[6] C. Vidal-Silva *et al.*, "Social influence, performance expectancy, and price value as determinants of telemedicine services acceptance in Chile," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, p. e27067, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27067.

[7] R. Alviani, B. Purwandari, I. Eitiveni, and M. Purwaningsih, "Factors Affecting Adoption of Telemedicine for Virtual Healthcare Services in Indonesia," *Journal of Information Systems Engineering and Business Intelligence*, vol. 9, no. 1, pp. 47–69, Apr. 2023, doi: 10.20473/jisebi.9.1.47-69.

[8] A. Bertolazzi, V. Quaglia, and R. Bongelli, "Barriers and facilitators to health technology adoption by older adults with chronic diseases: an integrative systematic review," *BMC Public Health*, vol. 24, no. 1, p. 506, Feb. 2024, doi: 10.1186/s12889-024-18036-5.

[9] X. Li, L. Huang, H. Zhang, and Z. Liang, "Enabling Telemedicine From the System-Level Perspective: Scoping Review," *J Med Internet Res*, vol. 27, p. e65932, Mar. 2025, doi: 10.2196/65932.

[10] C. O. Alenoghena *et al.*, "Telemedicine: A Survey of Telecommunication Technologies, Developments, and Challenges," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 12, no. 2, p. 20, Mar. 2023, doi: 10.3390/jsan12020020.

[11] K. Hossein, "The role of institutional capacity in developing teleconsultation: identifyingdimensions and indicators. Case study: Health services in the CoquimboRegion, Chile," ALBUS, 2024.

[12] A. Yinusa and M. Faezipour, "Optimizing Healthcare Delivery: A Model for Staffing, Patient Assignment, and Resource Allocation," *Applied System Innovation*, vol. 6, no. 5, p. 78, Aug. 2023, doi: 10.3390/asi6050078.

[13] Y. Qiao, Y. Zhai, R. Ma, M. Ji, and W. Lu, "Optimizing teleconsultation scheduling to make healthcare greener," *J Clean Prod*, vol. 422, p. 138569, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138569.

[14] S. Morelli, C. Daniele, G. D'Avenio, M. Grigioni, and D. Giansanti, "Optimizing Telehealth: Leveraging Key Performance Indicators for Enhanced TeleHealth and Digital Healthcare Outcomes (Telemechron Study)," *Healthcare*, vol. 12, no. 13, p. 1319, Jul. 2024, doi: 10.3390/healthcare12131319.

[15] S.-H. Tan, C.-K. Wong, Y.-Y. Yap, and S.-K. Tan, "Factors influencing telemedicine adoption among physicians in the Malaysian healthcare system: A revisit," *Digit Health*, vol. 10, Jan. 2024, doi: 10.1177/20552076241257050.

[16] H. Alamri and S. Alshagrawi, "Factors Influencing Telehealth Adoption in Managing Healthcare in Saudi Arabia: A Systematic Review," *J Multidiscip Healthc*, vol. Volume 17, pp. 5225–5235, Nov. 2024, doi: 10.2147/JMDH.S498125.

[17] F. Schürmann, D. Westmattelmann, and G. Schewe, "Factors Influencing Telemedicine Adoption Among Health Care Professionals: Qualitative Interview Study," *JMIR Form Res*, vol. 9, p. e54777, Jan. 2025, doi: 10.2196/54777.

[18] J. Arenas-Gaitán, P. E. Ramírez-Correa, P. Ledesma-Chaves, and L. J. Callarisa Fiol, "Medical teleconsultation from the patient's perspective. A demographic segmentation," *The European Journal of Health Economics*, Jan. 2025, doi: 10.1007/s10198-024-01753-4.

Modelo MAUT-KBP para la evaluación de planes IMRT en cáncer de próstata: Integración de teoría multicriterio y planificación basada en conocimiento

1st Liany Tobon-Castro
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
liany.tobon@pucv.cl

2nd Guillermo Cabrera-Guerrero
Escuela de Ingeniería Informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
guillermo.cabrera@pucv.cl

3rd Mauricio Moyano
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
mauricio.moyano@ucn.cl

***Abstract*—La Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) es esencial en el tratamiento del cáncer de próstata debido a su precisión en la conformación de la dosis. Sin embargo, la evaluación de la calidad de los planes sigue siendo un desafío, ya que los protocolos estándar se basan en un cumplimiento binario y no capturan los matices de los compromisos entre objetivos clínicos en conflicto. Este trabajo propone una integración metodológica entre la Planificación Basada en Conocimiento (KBP) y la Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM), utilizando la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT) para evaluar planes de IMRT clínicamente aprobados. Con base en un análisis retrospectivo de 91 planes de tratamiento, se definió un conjunto de indicadores sensibles, se modelaron funciones de utilidad y se calculó una Puntuación Global de Utilidad para jerarquizar la calidad de los planes. Los resultados preliminares demuestran que MAUT permite una discriminación robusta de los planes y revela diferencias clínicamente relevantes que los enfoques tradicionales no detectan. Los hallazgos respaldan la integración de KBP y MCDM como herramientas para fortalecer la toma de decisiones clínicas en radioterapia de cáncer de próstata.**

***Palabras clave*—IMRT, cáncer de próstata, evaluación de planes, toma de decisiones multicriterio, MAUT, planificación basada en conocimiento, KBP.**

La radioterapia de intensidad modulada (IMRT) es ampliamente utilizada por su capacidad de modular la dosis, maximizando la cobertura del volumen objetivo (PTV) y protegiendo órganos en riesgo (OARs) [1]. El flujo de planificación incluye simulación con tomografía, contorneo de volúmenes, definición de campos y aplicación de restricciones basadas en guías como QUANTEC [2], [3]. Posteriormente, el sistema de planificación (TPS) genera la distribución de dosis mediante optimización inversa y la calidad del plan se evalúa con histogramas dosis-volumen (DVH). Si cumple los criterios, se aprueba, se transfiere a sistemas de control como Record Verify (RV) y se valida con verificación independiente mediante *phantom* y análisis gamma [4].

Liany Tobon-Castro agradece el apoyo recibido del Programa de Doctorado en Ingeniería Informática de la Escuela de Ingeniería Informática de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, a través de una beca de manutención y una exención de arancel que cubre el 70% del costo del programa. Guillermo Cabrera-Guerrero agradece el apoyo del proyecto FONDECYT Regular 1241710 por el cofinanciamiento parcial de esta investigación.

Aunque este procedimiento asegura la viabilidad técnica, no garantiza que la solución aprobada sea la mejor para cada paciente. La evaluación se basa en protocolos binarios y en la experiencia del planificador [5], lo que limita la discriminación entre planes aceptables. Así, dos planes pueden cumplir un mismo criterio, como un V57Gy rectal $<15\%$, pero uno reducirlo al 10% y disminuir el riesgo de toxicidad. Sin embargo, ambos serían aceptados bajo la lógica actual [3]. Esto oculta gradientes de calidad y dificulta la selección de alternativas superiores [6]. Además, la optimización simultánea de múltiples parámetros genera configuraciones distintas sin certeza de alcanzar un óptimo global [7]. Los TPS tienden a producir soluciones localmente óptimas [8] y el proceso manual e iterativo introduce variabilidad entre profesionales y centros [9].

Para enfrentar estas limitaciones se han propuesto dos estrategias principales. La optimización multiobjetivo busca equilibrar criterios en conflicto, como la cobertura del PTV y la protección de OARs, mediante frentes de Pareto. Sin embargo, implica altos costos computacionales y requiere intervención activa [10]. La planificación basada en conocimiento (KBP) utiliza planes aprobados para capturar experiencia clínica y aplicarla en nuevos casos, reduciendo variabilidad y tiempos de planificación, aunque con limitaciones asociadas a percepción de precisión, costos e infraestructura [11].

En este escenario, la planificación de radioterapia se configura como un problema de toma de decisiones multicriterio (MCDM), caracterizado por múltiples objetivos jerárquicos y en conflicto [12]. La cobertura del PTV constituye la prioridad clínica, pero debe equilibrarse con la protección de OARs críticos como recto y vejiga, y secundarios como cabezas femorales, sin admitir compensaciones arbitrarias. Esta naturaleza jerárquica y la no convexidad del problema generan múltiples soluciones aceptables cuya selección depende en gran medida de la experiencia del planificador.

La Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT) ofrece una alternativa sólida, ya que integra criterios clínicos y dosimétricos en funciones de utilidad comparables y combina indicadores en un marco cuantitativo de evaluación [13]. En

radioterapia, permite sintetizar información heterogénea en un índice único, superando la lógica binaria y subjetiva [12], [14], además de facilitar análisis de sensibilidad y ajustes de preferencias clínicas [13]. No obstante, MAUT no incorpora de manera explícita el conocimiento empírico de la práctica clínica. Para ello, KBP aporta un valor diferencial, al funcionar como un repositorio validado que sitúa cada plan en relación con los mejores y peores resultados alcanzados. La combinación de ambos enfoques convierte la evaluación en un análisis integral y cuantitativo, capaz de distinguir entre planes que cumplen con holgura y aquellos que lo hacen de forma marginal, ofreciendo un sistema de apoyo a la decisión más transparente, reproducible y alineado con la práctica clínica [14].

El documento se organiza de la siguiente forma. La Sección II describe el método utilizado y la Sección III presenta los resultados preliminares derivados de su aplicación.

I. Método

A. Construcción de la base de datos

Se recolectaron y procesaron 91 planes de tratamiento previamente aprobados por profesionales clínicos del Instituto Oncológico de Viña del Mar, Chile, todos correspondientes a esquemas de radioterapia hipofraccionada (60 Gy en 20 fracciones). Los parámetros dosimétricos relevantes se extrajeron de los histogramas dosis-volumen (DVH), considerando únicamente planes de casos con tumores intra-prostáticos con el fin de mantener la homogeneidad en el análisis.

B. Definición de criterios e indicadores

La evaluación se realizó mediante indicadores que capturan tanto el cumplimiento binario de los umbrales como el margen de desempeño relativo frente a ellos. Se incluyó el *Cumplimiento Global*, que integra cobertura tumoral y restricciones a OARs, y el *Cumplimiento Relativo de OARs*, que refleja el margen de seguridad respecto a los límites clínicos. El *Cumplimiento Relativo del PTV* se basó en D98%, D50% y D2%, para valorar cobertura, dosis media y puntos calientes. A estos se sumó el *Cumplimiento Relativo Global*, que resume la adecuación del plan considerando PTV y OARs, junto con el *Índice de Homogeneidad*, que mide la uniformidad de la dosis en el PTV, y el *Índice de Cobertura*, que determina la proporción del volumen objetivo que recibe la dosis prescrita.

C. Aplicación de MAUT

Cada plan fue evaluado con los criterios definidos, transformados en una escala de 0 a 1 orientada a la maximización, donde valores altos reflejan mejor cumplimiento clínico y calidad dosimétrica. En esta primera fase, se asignaron pesos iguales y las utilidades se combinaron mediante una suma ponderada, obteniendo un Global Utility Score (GUS) que permitió ordenar los planes en un ranking de calidad. Actualmente, se desarrolla un análisis de sensibilidad con elicitación directa y asignación por puntos junto al personal clínico para generar escenarios de preferencia y evaluar la robustez del modelo.

Se utilizó una función de utilidad exponencial idéntica para cada criterio, que asigna valores entre 0 y 1 según la distancia entre el peor resultado observado y el mejor alcanzado (x_{opt}). De este modo, la utilidad máxima corresponde a x_{opt} y disminuye exponencialmente a medida que el plan se aleja de dicho punto. Así, el GUS no jerarquiza frente a valores ideales externos, sino que compara los planes dentro de la muestra, reflejando su cercanía al mejor desempeño y penalizando progresivamente a los más próximos al peor. Como trabajo en progreso, se consideran otras funciones de utilidad que representen con mayor precisión las preferencias clínicas según cada criterio.

II. Resultados Preliminares

Los resultados muestran que MAUT permitió discriminar de forma efectiva entre planes de distinta calidad dosimétrica. La clasificación ABC (Figura 1) evidenció que un grupo reducido concentró los valores más altos de utilidad global, mientras la mayoría se ubicó en niveles intermedios o bajos. La curva de Pareto (Figura 2) confirmó esta tendencia, al mostrar que sólo unos pocos planes aportan de manera significativa a la utilidad acumulada. Esto refuerza la utilidad del método para identificar y priorizar planes con excelencia clínica dentro de un conjunto amplio de alternativas.

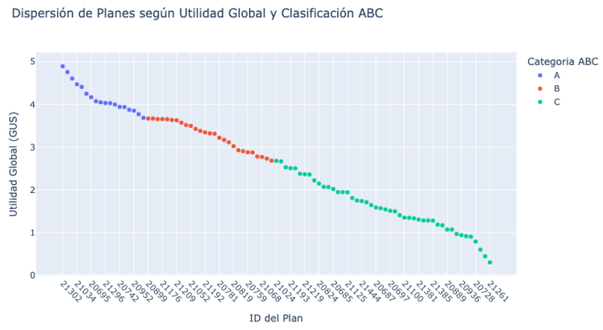


Fig. 1. Clasificación ABC de planes según Utilidad Global (GUS).

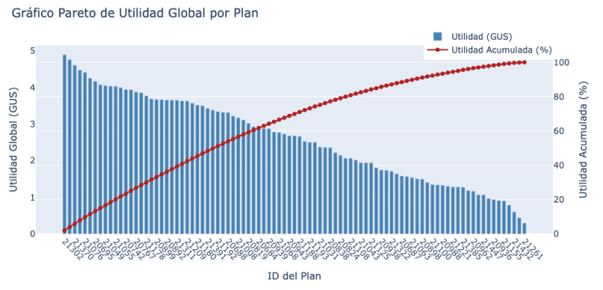


Fig. 2. Curva de Pareto de la Utilidad Global.

Las relaciones entre los indicadores y el Global Utility Score mostraron patrones consistentes. El cumplimiento relativo de órganos en riesgo (Figura 3) se correlacionó positivamente con la utilidad global, destacando que los mejores planes mantienen amplios márgenes de protección. De igual forma, el cumplimiento relativo del PTV (Figura 4) se asoció con puntajes altos de utilidad, confirmando que la cobertura adecuada del volumen objetivo es clave en la evaluación integral.

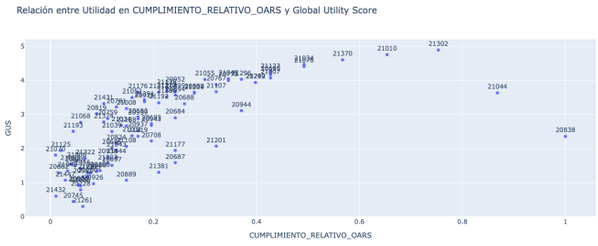


Fig. 3. Relación entre Cumplimiento Relativo de OARs y Utilidad Global.

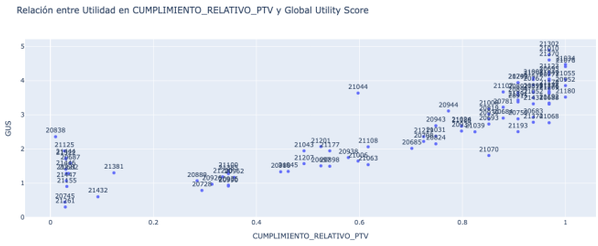


Fig. 4. Relación entre Cumplimiento Relativo de PTV y Utilidad Global.

Finalmente, los gráficos radar (Figura 5) ilustraron de forma intuitiva las diferencias entre los planes mejor y peor evaluados, mostrando brechas consistentes en cobertura, homogeneidad y protección de OARs, lo que evidencia que los planes de baja utilidad presentan deficiencias simultáneas en varios criterios críticos.

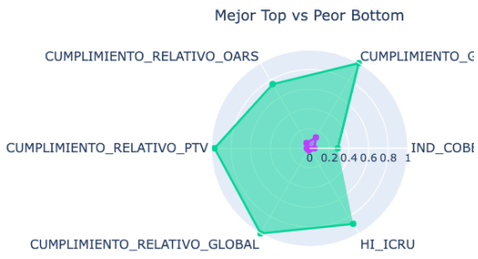


Fig. 5. Comparaciones radar entre planes Top 5 y Bottom 5.

En conjunto, los resultados muestran las fortalezas del enfoque, al ofrecer una evaluación sistemática que incorpora las preferencias clínicas, condensa el conocimiento mediante KBP al comparar cada plan con los mejores y peores de la cohorte, e integra el cumplimiento de normas internacionales. Los gráficos generados facilitan la interpretación del GUS y sirven como base para análisis de sensibilidad que ajusten los resultados según distintas prioridades clínicas.

REFERENCES

[1] Emre E. Özer, Şeyda Yılmaz, Özlem Güner, Ceren Karaman, Yılmaz Öztürk, and Duygu Arslan. Dosimetric comparison of intensity-modulated radiation therapy (imrt). *Turkish Journal of Oncology (Onkoloji Dergisi)*, 36(3):301–308, 2021.

[2] Mohammad Hussein, Ben J M Heijmen, Dirk Verellen, and Andrew Nisbet. Automation in intensity modulated radiotherapy treatment planning-a review of recent innovations. *The British journal of radiology*, 91(1092), 2018.

[3] Chunhao Wang, Xiaofeng Zhu, Julian C Hong, and Dandan Zheng. Artificial intelligence in radiotherapy treatment planning: Present and future. *Technology in cancer research treatment*, 18, 2019.

[4] Kerem Akartunalı, Vicky Mak-Hau, and Thu Tran. A unified mixed-integer programming model for simultaneous fluence weight and aperture optimization in vmat, tomotherapy, and cyberknife. *Computers Operations Research*, 56:134–150, 2015.

[5] Jim P Tol, Max Dahele, Alexander R Delaney, Ben J Slotman, and Wilko F A R Verbakel. Can knowledge-based DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans? *Radiation Oncology*, 10(1), 2015.

[6] Christian Rønn Hansen, Mohammad Hussein, Uffe Bernchou, Ruta Zukauskaite, and David Thwaites. Plan quality in radiotherapy treatment planning – review of the factors and challenges. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, 66(2):267–278, 2022.

[7] David Craft. Multi-criteria optimization methods in radiation therapy planning: a review of technologies and directions. *Physics in Medicine Biology*, 2013.

[8] Albin Fredriksson, Anders Forsgren, and Björn Hårdemark. Minimax optimization for handling range and setup uncertainties in proton therapy. *Medical Physics*, 38(3):1672–1684, 2011.

[9] Kevin L. Moore, R. Scott Brame, Daniel A. Low, and Sasa Mutic. Experience-based quality control of clinical intensity-modulated radiotherapy planning. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 81(2):545–551, Oct 2011.

[10] Masoud Zarepisheh, Linda Hong, Yueli Zhou, Qian Huang, Jie Yang, Gurudutt Jhanwar, Hiep D. Pham, Pelin Dursun, Peng Zhang, Margie A. Hunt, Gig S. Mageras, Jason T. Yang, Yoshiya Yamada, and Joseph O. Deasy. Automated and clinically optimal treatment planning for cancer radiotherapy. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 52(1):69–89, Jan-Feb 2022. Epub 2022 Feb 1.

[11] Andrew Robinson, Ian Gleeson, and Thankamma Ajithkuma. Can the use of knowledge-based planning systems improve stereotactic radiotherapy planning? a systematic review. *Journal of Radiotherapy in Practice*, 22(e89):1–10, 2023. Received: 10 September 2022; Revised: 15 December 2022; Accepted: 19 December 2022.

[12] Masoud Zarepisheh, Andres F. Uribe-Sanchez, Nan Li, Xun Jia, and Steve B. Jiang. A multicriteria framework with voxel-dependent parameters for radiotherapy treatment plan optimization. *Medical Physics*, 41(3):031710, 2014. Originally presented at the 54th Annual Meeting of the AAPM, Charlotte, NC, 2012.

[13] Ralph L. Keeney and Howard Raiffa. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. Wiley, 1976.

[14] Andrea Raith, Matthias Ehrgott, Fariza Fauzi, Kuan-Min Lin, Andrew Macann, Paul Rouse, and John Simpson. Integrating data envelopment analysis into radiotherapy treatment planning for head and neck cancer patients. *European Journal of Operational Research*, 296(1):289–303, 2022.

Session N°6 – Track N°3

Network Design and Location

Chair: Dávila-Soria, D. *(Universidad de los Andes)*
Place: G6-055
Time: 10:30 – 11:45

Districting in Urban Bus Transportation Systems for Fare Inspections

Time: 10:30 – 10:45
Authors:

- Cerda, D. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Escalona, P. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Alcota, M. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Angulo, A. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*

Localización para Instalaciones de Emergencia ante Inundaciones en Paraguay

Time: 10:50 – 11:05
Authors:

- Barrientos, B. *(Universidad Nacional de Asunción)*
- Saldívar, T. *(Universidad Nacional de Asunción)*
- Cardozo, R. *(Universidad Nacional de Asunción)*
- Recalde-Ramírez, J. *(Universidad Nacional de Asunción)*
- López, M. *(Universidad Nacional de Asunción)*

Diseño de Redes de Reciclaje Sostenibles de Baterías de Iones de Litio

Time: 11:10 – 11:25
Authors:

- Bernal, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Herrera-León, S. *(Universidad de O'Higgins)*
- Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*

A Branch & Cut Algorithm to Solve the Joint Location Inventory Problem Under Fill-Rate Service Level Constraints and a Full Backorders Approach

Time: 11:30 – 11:45
Authors:

- Mora-Quijada, C. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Escalona, P. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*

Districting in urban bus transportation systems for fare inspections

Daniel Cerda
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
daniel.cerdac@usm.cl

Pablo Escalona
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
pablo.escalona@usm.cl

Mario Alcota
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
mario.alcota@usm.cl

Alejandro Angulo
Department of Electrical Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
alejandro.angulo@usm.cl

***Abstract*—Fare evasion is a critical challenge to the financial and operational sustainability of public transportation systems. This paper presents a district-based approach to organize fare inspections in urban bus systems. A mixed integer programming model is proposed to partition the bus network into districts that are balanced in terms of number of buses running, spatially compact, and contiguous. Under this approach, the inspection teams are allocated to follow random inspection routes within their respective districts. We use a algorithm based on cutting-planes to solve the proposed model. Computational experiments in the urban bus transportation system of Independencia show the trade-off between the balance of the districts and their spatial compactness.**

***Index Terms*—Urban bus system, graph partitioning, balance, contiguity, compactness, fare evasion.**

I. Introduction

Fare evasion in public transportation systems remains one of the major challenges to the economic and operational sustainability of these services [1]. This practice generates substantial financial losses, limits the investment capacity in service improvements, and directly affects the perception of system quality [2]. The absence of effective enforcement fosters a social learning effect, where evasive behavior becomes normalized and potential fare evaders learn by observing others [3].

Urban bus transportation systems are especially vulnerable to fare inspection due to the number of bus stops, the number of bus lines, and the diversity of service routes that characterize bus transportation networks. For instance, in the public bus system of Santiago, Chile, evasion reached 37.5% in the second half of 2024 [4]. Although evasion rates are substantially lower in developed countries, they may be underestimated [5]. For instance, in the bus system of New York, USA, evasion reached 44% in the first quarter of 2025 [6].

In response, transit authorities have implemented several methods to ensure fare payment, the main ones being passenger inspections and fine enforcement [7]. The deployment policies followed by the inspection teams are spot deployment policy, in which each inspection team is allocated to a specific geographic location where they keep controlling fare payment, and patrolling deployment policy, where each inspection team follow predefined paths controlling fare payment in differents geographic locations [8].

This paper proposes a district-based approach to organize fare inspections. Under this scheme, the transit network is partitioned into geographic districts with a balanced number of buses running, and inspection teams are allocated to follow random inspection routes within their respective districts. This approach offers operational advantages.

- First, it simplifies the patrolling scheduling efforts required from the transit authority. Patrolling requires the complex task of designing detailed inspection routes for each inspection team, which are difficult to complete in space and time due to interruptions [9]. In contrast, under a district-based system, inspection teams define their routes randomly and dynamically, allowing greater flexibility from disruptions.
- Second, balancing the number of buses running on districts promotes fairness and equity across inspection teams. They face similar workloads and comparable idle times while waiting for the next bus to control.

In this study, we address the problem of designing fare inspection districts in urban bus networks, where the system is modeled as an undirected graph. In this representation, nodes correspond to bus stops and edges correspond to connections between them. The objective is to partition the set of edges into a fixed number of geographically contiguous districts that are balanced in terms of number of buses running and compact in spatial structure. Unlike most districting problems in the literature, where the workload of each basic unit (e.g., node, area, or edge) is treated as an independent and additive

attribute, the district workload in our problem depends on the interaction between basic units, since bus lines typically run multiple edges. Therefore, the number of buses running on a district cannot be computed as the sum of the workloads of its edges. This interdependence adds difficulty to the modeling and solution of the problem, distinguishing it from classical formulations for districting problems. To the best of our knowledge, it is the first time that a mathematical formulation is proposed for edge-based districting oriented to fare inspection, explicitly addressing the three basic districting criteria: balance, compactness and contiguity [10].

II. Mathematical formulation

This section presents a mathematical model to partition an urban bus network into districts for fare inspection. We begin by introducing the notation used to formulate it using a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model. Then, we present the linearization of the proposed model.

We consider an urban bus transportation system represented by a directed graph $G = (V, E)$, where V $(v = 1, ..., |V|)$ is the set of nodes representing bus stops and E $(e = 1, ..., |E|)$ is the set of edges representing the connections between bus stops. Let L $(l = 1, ..., |L|)$ be the set of bus lines in the system and h_l be the number of buses of line l running during a time interval Π. Let $\mathcal{E}_l$ be the set of edges followed by bus line l in G. The edge set E is partitioned into two subsets: E_1, which contains the edges used by at least one bus line, and E_2, with the edges that are not used by any bus line and connect nearby bus stops. Let B_e be the set of adjacent edges to $e \in E$. Let $P \subset E_1$ be the set of candidates to be centers of fare inspection districts.

The following parameters are known: n, maximum number of districts; α, maximum acceptable percentage of difference betweeen the number of buses running on the districts; $M = \sum_{l \in L} h_l$, upper bound for the number of buses running on a district; $\tau_{ee'}$, time from edge e to edge e' obtained through a shortest path algorithm; $d_{ee'}$, distance between the edges e and e', according to the approximation of geodesic coordinates to points in a 2-D Cartesian coordinate system.

The following decision variables are defined:

- X_p, binary variable equal to 1 if center $p \in P$ is selected.
- Y_{pe}, binary variable equal to 1 if edge $e \in E$ is assigned to center $p \in P$.
- H_{pl}, binary variable equal to 1 if bus line l runs on the district with center $p \in P$.
- Q_p, continuous variable that denotes the number of buses running on the district with center $p \in P$.
- $\overline{Q}$, continuous variable that represents the highest number of buses running on a district.
- $\underline{Q}$, continuous variable that represents the lowest number of buses running on a district.

Using the above notation, the proposed MINLP is as follows:

$$\min_{\substack{X,Y,H,\\ Q,\overline{Q},\underline{Q}}} \sum_{p \in P} \sum_{e \in E_1} d_{pe} Y_{pe} \tag{1}$$

$$s.t: \sum_{p \in P} Y_{pe} = 1 \qquad \forall e \in E_1 \tag{2}$$

$$\sum_{p \in P} Y_{pe} \geq 1 \qquad \forall e \in E_2 \tag{3}$$

$$Y_{pe} \leq X_p \qquad \forall p \in P, \forall e \in E \tag{4}$$

$$\sum_{k \in B_e:\, \tau_{pk} < \tau_{pe}} Y_{pk} \geq Y_{pe} \qquad \forall p \in P, \forall e \in E \setminus \{p\} \tag{5}$$

$$H_{pl} \geq Y_{pe} \qquad \forall p \in P, \forall l \in L, \forall e \in \mathcal{E}_l \tag{6}$$

$$H_{pl} \leq \sum_{e \in \mathcal{E}_l} Y_{pe} \qquad \forall p \in P, \forall l \in L \tag{7}$$

$$Q_p = \sum_{l \in L} h_l H_{pl} \qquad \forall p \in P \tag{8}$$

$$\overline{Q} \geq Q_p \qquad \forall p \in P \tag{9}$$

$$\underline{Q} X_p \leq Q_p \qquad \forall p \in P \tag{10}$$

$$\overline{Q} \leq \underline{Q}(1 + \alpha) \tag{11}$$

$$\sum_{p \in P} X_p \leq n \tag{12}$$

$$X_p, Y_{pe}, H_{pl} \in \{0, 1\} \qquad \forall p \in P, e \in E, l \in L \tag{13}$$

$$0 \leq Q_p, \overline{Q}, \underline{Q} \leq M \qquad \forall p \in P \tag{14}$$

The objective function (1) minimizes a dispersion measure given by the sum of the distances of each edge to its assigned center, managing the compactness of the districts. Constraints (2) and (3) ensure that each edge used by at least one bus line must be assigned to only one district and each edge that is not used by any bus line must be assigned to at least one district. Constraints (4) establish that a edge could be assigned to a center only if the center is selected. Constraints (5) enforce district contiguity. These constraints guarantee contiguity but eliminates some contiguous districts [11].

Constraints (6) and (7) ensure that if at least one edge in the route followed by bus line l is assigned to center p then $H_{pl} = 1$ and if any edge in the route followed by bus line l is assigned to center p then $H_{pl} = 0$. Constraints (8) calculate the number of buses running on each district. Constraints (9) and (10) define the highest and lowest number of buses running on a district. Constraint (11) balances the number of buses running on the districts, so the difference between the number of buses running on the districts does not exceed the allowed tolerance. Constraint (12) limits the number of districts. Finally, constraints (13) and (14) restrict the domains of the variables.

Constraints (10) are nonlinear due to the multiplication of X_p by $\underline{Q}$. To linearize the model, we introduce an auxiliary variable $Z_p = \underline{Q} X_p$. By considering this variable, we obtain the following Mixed Integer Programming (MIP) model.

Objective function (1)

$$s.t: Z_p \leq Q_p \qquad \forall p \in P \qquad (15)$$

$$Z_p \leq M X_p \qquad \forall p \in P \qquad (16)$$

$$Z_p \leq \underline{Q} \qquad \forall p \in P \qquad (17)$$

$$Z_p \geq \underline{Q} - (1 - X_p)M \qquad \forall p \in P \qquad (18)$$

$$Z_p \geq 0 \qquad \forall p \in P \qquad (19)$$

(2) to (9) and (11) to (18)

III. Solution Approach

The inclusion of contiguity constraints in the formulation introduces significant computational challenges, particularly for real-world urban bus networks. Therefore, in this work, we adopt a decomposition approach based on a cutting-plane algorithm to handle contiguity efficiently.

The proposed algorithm iteratively solves relaxed versions of the original problem, in which the contiguity constraints (5) are initially relaxed. The resulting relaxed MIP is solved using a branch-and-bound algorithm. Each time an incumbent solution is found, we verify whether this solution satisfies the contiguity requirements. If any district in the incumbent is disconnected, then violated contiguity constraints are identified and added dynamically to the model as cutting planes. The addition of these violated constraints rejects this incumbent that is infeasible for the original model. Therefore, the saved incumbent solutions are upper bounds for the original problem. The process continues until an optimal solution that satisfies all contiguity constraints is obtained.

To verify the connectivity of each district in a given incumbent solution, we construct a subgraph for each district and apply a standard graph traversal algorithm (e.g., breadth-first search or depth-first search) to determine the connected components. If more than one connected component is found within a district, the set of disconnected edges is used to generate violated contiguity constraints, which are then added to the model.

IV. Computational results

The proposed districting model was tested on the urban bus transportation system of Independencia, a municipality of Santiago, Chile. The network consists of 148 bus stops, 227 edges (of which 155 are used by at least one bus line), and 36 bus lines.

The solution method was implemented in Python 3.12.3 and solved using GUROBI 12.0.2. Our experiments consider $n = 3$ maximum number of districts and three values of the balance parameter $\alpha = \{0.5, 0.25, 0.1\}$. The dispersion measure associated with district compactness were 86076, 88947, and 91793 for $\alpha = 0.5$, $\alpha = 0.25$, and $\alpha = 0.1$, respectively. These results highlight a trade-off between the balance of the districts and their spatial compactness: higher balance requirements tend to reduce compactness.

Fig. 1 illustrates the districts generated for $n = 3$ under the three values of α, showing how districts adjust to achieve higher balance at the expense of compactness.

(a) $\alpha = 0.5$ (b) $\alpha = 0.25$ (c) $\alpha = 0.1$

Fig. 1. Fare inspection districts in Independencia for $n = 3$.

V. Conclusion

This work introduced a district-based approach for organizing fare inspections in urban bus transportation systems. We proposed a mixed-integer programming model to partition the bus network into contiguous, compact, and balanced districts in terms of the number of buses running. A cutting-plane algorithm was developed to efficiently handle the contiguity constraints of the model.

Computational experiments on the bus network of Independencia, Santiago, demonstrated the applicability of the proposed approach. The results showed a clear trade-off between district balance and spatial compactness, with stricter balance requirements leading to less compact districts.

The proposed method simplifies the scheduling of inspection activities and promotes fairness in workload distribution of inspection teams.

References

[1] B. Barabino, and S. Salis, "Segmenting fare-evaders by tandem clustering and logistic regression models," Public Transp, vol. 15, pp. 61–96, 2023.

[2] A. V. Reddy, J. Kuhls, and A. Lu, "Measuring and controlling subway fare evasion: Improving safety and security at New York City transit authority," Transportation Research Record, vol. 2216, pp. 85-99, 2011.

[3] P. Guarda, P. Galilea, L. Paget-Seekins, and J. D. Ortúzar , "What is behind fare evasion in urban bus systems? An econometric approach," Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 84, pp. 55-71, 2016.

[4] DTPM, "Indice de evasión en buses del sistema de Transporte Público Metropolitano," Metropolitan Public Transport Department, 2025.

[5] R. Ramos, and H. Silva , "Fare evasion in public transport: How does it affect the optimal design and pricing?," Transportation Research Part B: Methodological, vol. 176, 2023.

[6] MTA, "Bus Fare Evasion," Metropolitan Transportation Authority, 2025.

[7] B. Barabino, M. Carra, and G. Currie, "Fare inspection in proof-of-payment transit networks: A review," Journal of Public Transportation, vol. 26, 2024.

[8] P. Escalona, L. Brotcorne, B. Fortz, and M. Ramírez, "Fare inspection patrolling under in-station selective inspection policy," Annals of Operations Research, vol. 332, pp. 191-212, 2024.

[9] F. M. Delle Fave, M. Brown, C. Zhang, E. Shieh, A. X. Jiang, H. Rosoff, M. Tambe and J. P. Sullivan, "Security games in the field: Deployments on a transit system," in Engineering Multi-Agent Systems, Springer, pp. 103-126, 2014.

[10] F. Ricca, A. Scozzari, and B. Simeone, "Political districting: from classical models to recent approaches," Annals of Operations Research, vol. 204, pp. 271-299, 2013.

[11] A. Mehrotra, E. L. Johnson, and G. L. Nemhauser, "An optimization based heuristic for political districting," Management Science, vol. 44, pp. 1100-1114, 1998.

Localización para instalaciones de emergencia ante indundaciones en Paraguay

Brenda C. Barrientos C.
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
brenbarrien@fpuna.edu.py

Tadeo R. Saldívar P.
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
tadeosaldivar2@gmail.com

Romina Cardozo G.
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
rominacardozog68@fpuna.edu.py

Jorge L. Recalde-Ramírez
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
jrecalde@pol.una.py

María M. López
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay
mlopez@pol.una.py

Resumen— **En el mundo, los desastres climáticos han aumentado en frecuencia, intensidad y magnitud como resultado del cambio climático, afectando desproporcionadamente a las comunidades más vulnerables. Las inundaciones (27%) y tormentas (12%) representan la mayoría de estos fenómenos, lo cual refleja la creciente presión del cambio climático sobre los sistemas humanos y ambientales. Cada año, las inundaciones afectan a un mayor número de personas, a nivel mundial, que cualquier otro desastre. En 2019, se produjeron ciento veintisiete inundaciones en sesenta y nueve países, con la consiguiente muerte de mil quinientas ochenta y seis personas y el desplazamiento de otros diez millones (Observatorio de Desplazamiento Interno, 2019). El país más afectado por las inundaciones fue Irán, con diez millones de personas damnificadas en 2019, seguido por Malaui (991.648) y Paraguay (521.191). Las inundaciones fluviales son recurrentes en Asunción y el Departamento Central de Paraguay desplazan a miles de personas. En Asunción, aproximadamente 100.000 personas o bien alrededor del 20% de la población viven en zonas ribereñas inundables, especialmente en los bañados Norte, Sur y Tacumbú. Estas comunidades, ante cada evento de crecida, se ven obligadas a abandonar sus viviendas, lo que conlleva consecuencias sociales y económicas severas en aspectos como salud, educación y seguridad alimentaria. La respuesta institucional ante estas emergencias incluye necesidades básicas de supervivencia tales como el alojamiento provisional, servicios de saneamiento, asistencia médica, alimentos, agua potable, kits de emergencia, entre otros servicios, Los mismos son habilitados por la Secretaría de Emergencia Nacional (SEN), Municipalidades, La cruz Roja Paraguaya, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), Unión Europea (UE), Organización Internacional de las Migraciones (OIM). Los problemas identificados en la gestión de ayuda humanitaria por inundaciones incluyen la ubicación inadecuada o la saturación de los albergues, esto genera retrasos en la respuesta y un aumento en el sufrimiento de las comunidades desplazadas. Estos retrasos se deben, en gran medida, a la falta de una distribución eficiente de recursos y de refugios previamente definidos. Además, la falta de optimización en la ubicación y la tasa de utilización de los albergues disponibles genera un desperdicio de recursos financieros y logísticos, como víveres, transporte y medicinas. La mala gestión prolonga la vulnerabilidad social de las comunidades afectadas, ya que las personas desplazadas permanecen durante más tiempo en condiciones precarias, sin acceso adecuado a servicios básicos. Además, esta situación disminuye la resiliencia de las zonas impactadas, dejándolas menos preparadas para enfrentar futuros eventos extremos y aumentando su exposición al riesgo ante nuevas emergencias. Estas consecuencias reflejan la necesidad de mejorar las estrategias nacionales frente a desastres, para avanzar hacia un país más resiliente ante el cambio climático. El uso de modelos matemáticos para la localización óptima de instalaciones de emergencia representa una herramienta útil para tomadores de decisiones, especialmente en el contexto de cambio climático y el aumento de eventos extremos. El objetivo general de este trabajo Localizar instalaciones de emergencia ante desastres ambientales, específicamente inundaciones fluviales, en Asunción y el departamento central, utilizando modelos de localización óptima de instalaciones, para lo cual en esta investigación se formularon y se resolvieron 10 modelos de localización que incluyen por ejemplo los modelos clásicos de Cobertura de Conjuntos (SCLP) y Máxima Cobertura (MCLP), para determinar la ubicación óptima de instalaciones temporales (albergues o puestos de asistencia) que garanticen la atención de la población afectada. Como metodología para el modelamiento matemático se seguirán cinco pasos principales, que se describen a continuación: 1. Definición de procesos de localización de instalaciones/servidores temporales (albergues, baños, comedores, dispensarios, etc.) según las necesidades de la emergencia. 2. Selección de los modelos matemáticos que se utilizarán para optimizar la localización y distribución de recursos en situaciones de emergencia. 3. Identificación de parámetros y variables como la demanda de instalaciones/servidores, distancias y capacidades, y formulación de un modelo matemático con uno o más objetivos. 4. Recolección de datos necesarios para definir los valores de los parámetros de los modelos y la definición de restricciones. 5. Selección, programación computacional y resolución de los modelos matemáticos. Se modelaron como nodos de demanda para 62 barrios vulnerables con un total de 368.660 habitantes, y 51 sitios candidatos identificados a partir de albergues y centros de salud utilizados en emergencias previas. Las distancias reales entre nodos se estimaron con datos geográficos censales (centroides) y la librería geopy. Los modelos, codificados en Python, utilizando el módulo de optimización Gurobi, se evaluaron con radios de cobertura entre 1 y 10 km.**

Para resolver el problema de localización de instalaciones de emergencia, se ejemplifica a continuación uno de los modelos analizados. Modelo 1: Problema de Localización por Cobertura de Conjuntos (Set Covering Location Problem - SCLP)

El modelo determina la ubicación mínima necesaria de instalaciones de modo que cada punto de demanda esté cubierto por al menos una instalación dentro de una distancia o tiempo de respuesta máximo aceptable.

Conjuntos:

I: conjunto de nodos que representan puntos de demanda. $I = 1, 2, \dots, |I|$

J: conjunto de nodos que representan ubicaciones candidatas. $J = 1, 2, \dots, |J|$

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Parámetros:
a_{ij} = 1, si el cliente i puede ser cubierto por el servidor instalado en j, 0 en caso contrario
Variables de Decisión:
x_j: variable binaria que toma valor 1 cuando el servidor es instalado en la ubicación $j \in J$, 0 cuando no.
El modelo representativo es:

$$Min\ Z = \sum_{j=1}^{J} x_j \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{J} x_j * a_{ij} \geq 1 \quad \forall\, i \in I \quad (2)$$

$$x_j \quad binarias \ \forall\, j \in J \quad (3)$$

La función objetivo (1) minimiza el número de instalaciones seleccionadas. La restricción (2) garantiza que cada punto de demanda sea cubierto por al menos una instalación y la (3) representa la naturaleza de la variable de decisión. Entre los resultados obtenidos, con datos preliminares, se ejemplifica que con un radio de 9 km, el modelo de Máxima Cobertura o MCLP cubre el 99,99 % de la población con solo 4 instalaciones y alcanza la cobertura total (100 %) con 5 instalaciones, mientras que el Modelo de Cobertura de Conjuntos o SCLP también logra cobertura total con 5 instalaciones. En cambio, con 8 km el MCLP necesita 5 instalaciones para cubrir el 99,3 % de la demanda y el SCLP resulta inviable dentro de ese radio. Estos hallazgos demuestran que la configuración de 5 instalaciones a 9 km optimiza la cobertura, y que el MCLP ofrece alternativas casi óptimas con menos recursos cuando existen limitaciones logísticas. A continuación, se describen los resultados más relevantes para el Modelo de Cobertura de Conjuntos (SCLP) que fue descripto anteriormente. La figura 1, muestra la relación entre el radio de cobertura y el porcentaje de demanda cubierta. A partir de un radio de 9 km, el modelo comienza a ser factible, con una cobertura del 100%. Para radios menores, el modelo no alcanza soluciones factibles.

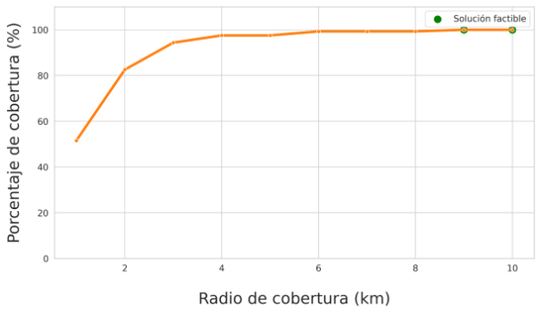
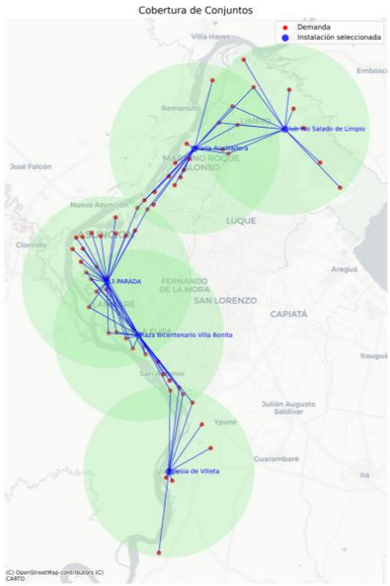
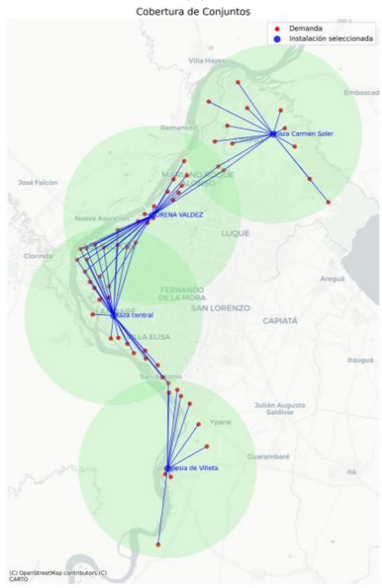


Figura 1. Cobertura del modelo SCLP en función del radio.

En la Figura 2 se presentan las soluciones obtenidas del modelo SCLP. En la parte (a), para un radio de 9 km, se seleccionaron cinco instalaciones que cubren la demanda total, mientras que en la parte (b), con un radio de 10 km, la solución óptima requiere cuatro instalaciones. Durante el procesamiento, se generaron distintos escenarios de análisis según disponibilidad de datos, limitaciones, número de instalaciones/servidores habilitables y niveles de población afectada. Algunos de estos escenarios son la comparación del porcentaje de cobertura obtenido para un número variable de instalaciones o radio de cobertura. Los resultados obtenidos se procesaron y son visualizados mediante tablas, gráficos y mapas temáticos, de modo a facilitar la interpretación y comparación entre modelos escenarios. Los resultados respaldan la adopción de modelos de localización en la planificación de albergues de emergencia, mejorando la eficiencia operativa y la equidad en la asistencia.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Solución óptima del modelo con radio de 9 km. (b) Solución óptima del modelo con radio de 10 km.
Para futuras investigaciones se sugiere incorporar variables como costos, capacidad de aforos, tiempos de montaje y accesibilidad, así como análisis de sensibilidad de niveles de riesgo de inundación fluvial y simulacros que validan empíricamente las propuestas. *Keywords—* **logística humanitaria, modelos de localización, inundaciones, programación lineal entera mixta, optimización.**

Agradecimientos: A la beca PUBIABM y a la Ganadera 13 de Mayo S.A, por su contribución significativa a la realización del trabajo. Al Grupo de Investigación de Operaciones e Inteligencia Artificial (GIOIA) de la FPUNA por su apoyo en el desarrollo de la investigación.

Diseño de Redes de Reciclaje Sostenibles de Baterías de Iones de Litio

Pablo Bernal
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
pablo.bernal@ce.ucn.cl

Sebastián Herrera-León
Instituto de Ciencias de la Ingeniería
Universidad de O'Higgins
Rancagua, Chile
sebastian.herrera@uoh.cl

Pablo Miranda-González
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
pablo.miranda@ucn.cl

***Resumen*—Se propone un modelo de optimización lineal entera mixta para diseñar redes de reciclaje de baterías de ión-litio, considerando simultáneamente criterios económicos, ambientales y sociales. El modelo propuesto emplea un enfoque multiobjetivo y considera aceptación social basada en la cercanía a zonas pobladas. Se presentan resultados preliminares que ilustran la activación óptima de nodos y rutas logísticas**

***Keywords*—Aceptación social, economía circular, reciclaje de baterías de ión-litio, sostenibilidad**

I. Introducción

El diseño de redes de reciclaje de baterías de ion litio (LIB) que consideren simultáneamente los tres pilares de la sostenibilidad, ambiental, económica y social, es fundamental para avanzar hacia una economía circular en el sector energético [1], [2], [3]. Desde la perspectiva ambiental, el reciclaje de LIB permite recuperar materiales críticos como litio, cobalto y níquel, reduciendo la disposición final de residuos industriales y atenuando los impactos asociados a la extracción de recursos naturales [4], [5], [6]. En términos económicos, las redes compuestas por centros regionales de pretratamiento descentralizados y plantas de procesamiento centralizadas permiten disminuir costos logísticos y mejorar la viabilidad financiera del reciclaje [7], [8].

En este contexto, el artículo presenta un modelo de optimización lineal entera mixta (MILP, en inglés) multiobjetivo para el diseño de redes de reciclaje de LIB. El modelo incorpora simultáneamente costos económicos, impactos ambientales y aceptación social de las instalaciones.

II. Modelo de Optimización

Esta sección presenta la formulación matemática del modelo MILP utilizado para el diseño de la red de reciclaje de LIB. Se describen los conjuntos, parámetros, variables de decisión, funciones objetivo y restricciones que estructuran el problema

II-A. Conjuntos y parámetros

Para el modelado de la red, se consideran dos tipos de nodos: centros de recolección y plantas de reciclaje. Adicionalmente, se incorporan zonas de generación de baterías de ión-litio residuales (EoL-LIB, en inglés), las cuales presentan distintas densidades poblacionales. Tal como se ilustra en la Fig. 1, se incluyen zonas de alta densidad (valor de 50), baja densidad (valor de 10), así como densidades intermedias, con el fin de representar escenarios diversos de generación de residuos.

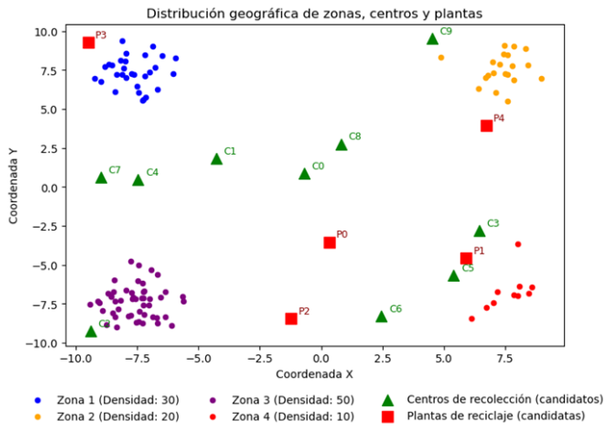


Figura 1. Conceptualización inicial de la red.

Los conjuntos y parámetros utilizados en el modelo se resumen en la Tabla I. El modelo considera los costos asociados al transporte y procesamiento de baterías, los costos de instalación de centros y operación de tecnologías de reciclaje. Asimismo, se incluyen las emisiones generadas durante las etapas de transporte y procesamiento de los residuos. Finalmente, se incorpora la aceptación relativa social relacionada a la tecnología seleccionada e implementada.

Los parámetros cruciales de costos y emisiones fueron obtenidos mediante el software EverBatt [9].

II-B. Variables de decisión

Las variables consideradas se muestran la Tabla II

II-C. Funciones objetivo y restricciones

El modelo de optimización propuesto busca diseñar una red de reciclaje de LIB sostenible minimizando tres objetivos: (1) costos de implementación y operación asociados a la red; (2) impacto ambiental asociado a emisiones de CO_2; (3) la aceptación social relativa a la selección e instalación de las tecnologías de reciclaje

Tabla I
CONJUNTOS Y PARÁMETROS DEL MODELO

Conjuntos	
I	Zonas generadoras de LIB
J	Potenciales centros de recolección
K	Potenciales plantas de reciclaje
T	Tecnologías de reciclaje
Parámetros	
c_{ij}	Costo unitario de transporte desde la zona i al centro j
c_{jk}	Costo unitario de transporte desde el centro j a la planta k
f_j	Costo de instalación del centro de recolección j
f_k	Costo de instalación de la planta de reciclaje k
r_{kt}	Costo asociado al uso de la tecnología t en la planta k
q_i	Cantidad de LIB generadas en la zona i
e_{ij}	Impacto ambiental unitario del transporte entre i y j
e_{jk}	Impacto ambiental unitario del transporte entre j y k
e_{kt}	Impacto ambiental unitario del procesamiento con tecnología t en k
α_j	Aceptación social del centro j
α_k	Aceptación social de la planta k
α_{kt}	Aceptación social de la tecnología t en la planta k
$C_j^{\text{máx}}$	Capacidad máxima del centro j
$C_k^{\text{máx}}$	Capacidad máxima de la planta k
ρ_1, ρ_2, ρ_3	Ponderadores de los objetivos económico, ambiental y social

Tabla II
VARIABLES DE DECISIÓN DEL MODELO

Variable	**Descripción**
x_{ij}	Cantidad de LIB transportadas desde la zona i al centro j
y_{jk}	Cantidad de LIB enviadas desde el centro j a la planta k
z_j	Variable binaria que indica si el centro j es instalado
w_k	Variable binaria que indica si la planta k es instalada
θ_{kt}	Variable binaria que indica si en la planta k se implementa la tecnología t

$$\min Z_1 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c_{ij}x_{ij} + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} c_{jk}y_{jk} + \sum_{j\in J} f_j z_j + \sum_{k\in K} f_k w_k + \sum_{k\in K}\sum_{t\in T} r_{kt}\theta_{kt} \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} e_{ij}x_{ij} + \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} e_{jk}y_{jk} + \sum_{k\in K}\sum_{t\in T} e_{kt}\theta_{kt} \quad (2)$$

$$\min Z_3 = \sum_{j\in J}(1-\alpha_j)z_j + \sum_{k\in K}(1-\alpha_k)w_k + \sum_{k\in K}\sum_{t\in T}(1-\alpha_{kt})\theta_{kt} \quad (3)$$

Las restricciones principales son: (4) balance de LIB entre zonas y centros; (5) balance de flujo en los centros de recolección; (6) capacidad máxima de los centros; (7) capacidad máxima de las plantas; (8) asignación tecnológica en plantas activas; y (9) dominio de las variables.

$$\sum_{j\in J} x_{ij} = q_i, \qquad \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} = \sum_{k\in K} y_{jk}, \qquad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} \le C_j^{\text{máx}} z_j, \qquad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{j\in J} y_{jk} \le C_k^{\text{máx}} w_k, \qquad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{t\in T} \theta_{kt} = w_k, \qquad \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_{ij},\, y_{jk} \ge 0, \quad z_j,\, w_k,\, \theta_{kt} \in \{0,1\} \quad (9)$$

II-D. Método de resolución

Para resolver el modelo se adopta un enfoque de suma ponderada, en el cual las funciones objetivo económica, ambiental y social se integran en una única función compuesta. En este artículo, el análisis se restringe a una solución representativa obtenida con la siguiente configuración de ponderadores:

$$\rho_1 = 20\,\%, \quad \rho_2 = 40\,\%, \quad \rho_3 = 40\,\%$$

En otras palabras, se asigna un 20 % de importancia a los factores económicos y un 40 % a los factores ambientales y sociales, respectivamente.

II-E. Determinación de la aceptación social relativa

La aceptación social relativa de los centros de recolección y de las plantas de reciclaje se modela como un parámetro que penaliza la cercanía de estas instalaciones a zonas densamente pobladas. Para cada nodo n (centro o planta), se calcula un puntaje inverso al cociente entre la densidad poblacional de cada zona y la distancia entre la zona y el nodo. Este puntaje se normaliza e invierte para obtener un valor de aceptación en el rango [0,1], donde 1 representa aceptación total y 0 rechazo total:

$$\text{Aceptación}(n) = 1 - \frac{\sum_i \frac{d_i}{D_{in}} - \text{mín}}{\text{máx} - \text{mín}} \quad (10)$$

donde d_i es la densidad poblacional de la zona i, D_{in} es la distancia entre la zona i y el nodo n, y el denominador corresponde a la normalización min–máx. Esta simulación se muestra en la Tabla III. El cálculo de la aceptación social considera todas las zonas de generación. Por lo tanto, aunque la planta P3 presenta un puntaje perfecto de aceptación social ($\alpha_k = 1{,}00$), este resultado es consecuencia del proceso de normalización. Al observar la Fig. 1, se aprecia que dicha planta se encuentra relativamente cerca de la Zona 1, la cual posee una densidad moderada (30). Sin embargo, la distribución espacial y la distancia relativa a zonas de mayor densidad compensan su ubicación, resultando en una penalización menor en el proceso de normalización.

Tabla III
ACEPTACIÓN SOCIAL DE NODOS

Nodo	Tipo	α_n	Nodo	Tipo	α_n
C0	Centro	0.90	C8	Centro	0.92
C1	Centro	0.80	C9	Centro	0.86
C2	Centro	0.00	P0	Planta	0.32
C3	Centro	1.00	P1	Planta	0.00
C4	Centro	0.76	P2	Planta	0.27
C5	Centro	0.89	P3	Planta	1.00
C6	Centro	0.95	P4	Planta	0.62
C7	Centro	0.79			

La Fig. 2 muestra la red de reciclaje optimizada considerando únicamente los nodos activos seleccionados por el modelo. Se observa que el sistema establece una ruta única de transporte desde cada zona hacia un centro de recolección activo (C5) y, desde este, hacia una planta de reciclaje (P1). Esta configuración sugiere que el modelo priorizó una solución centralizada orientada al equilibrio entre los costos, el impacto ambiental del transporte y el procesamiento de baterías, así como la aceptación social de las instalaciones. Además, se aprecia que el centro y la planta seleccionados se ubican en posiciones estratégicas que permiten captar material desde zonas de alta densidad sin sacrificar eficiencia logística.

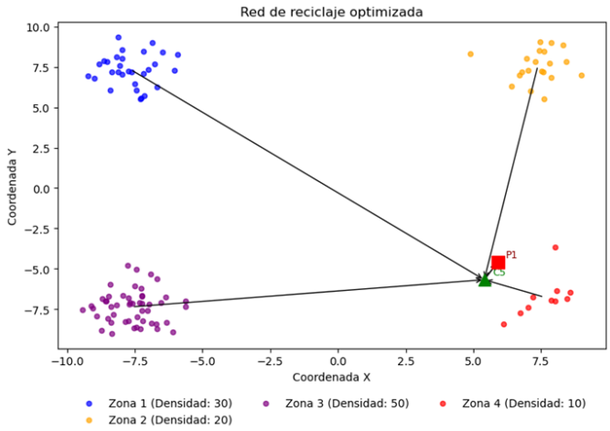


Figura 2. Resultados de la optimización

III. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un modelo de programación lineal entera mixta para diseñar redes sostenibles de reciclaje de baterías de ión-litio, considerando simultáneamente criterios económicos, ambientales y sociales. La inclusión de la aceptación social como un objetivo explícito permite capturar aspectos cualitativos relevantes para la implementación real del sistema. Los resultados muestran que es posible balancear el costo y el impacto ambiental con una configuración de red que privilegia ubicaciones socialmente aceptadas. Este tipo de herramientas puede ser útil para informar decisiones de política pública y planificación estratégica en el contexto de la economía circular. Futuros estudios deben ser desarrollados para cuantificar la aceptación social en un entorno real.

REFERENCIAS

[1] M. Wasesa, et al., "Economic and environmental assessments of an integrated lithium-ion battery waste recycling supply chain: A hybrid simulation approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 379, p. 134625, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134625.

[2] M. Jaradat, C. Bendea, S. Almashaileh, and G. Bendea, "Sustainable Strategies for E-Mobility: The Role of Battery Recycling in Mitigating Environmental Impact," in *Proceedings*, 2025, pp. 561–570, doi: 10.1007/978-3-031-81685-7_43.

[3] B. I. Chigbu and I. Umejesi, "Unlocking Economic and Environmental Gains Through Lithium-Ion Battery Recycling for Electric Vehicles," *Resources*, vol. 13, no. 12, p. 163, Nov. 2024, doi: 10.3390/resources13120163.

[4] M. Goyal, K. Singh, and N. Bhatnagar, "Circular economy conceptualization for lithium-ion batteries: material procurement and disposal process," *Chemical Engineering Science*, vol. 281, p. 119080, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.ces.2023.119080.

[5] J. I. S. Zúñiga, E. O. A. Marillán, A. R. Romero-Conrado, A. Olmedo, and G. Gatica, "Towards Sustainable Lithium-Ion Battery Recycling in Chile: A Conceptual Process Flowchart Proposal," in *Proceedings*, 2025, pp. 49–62, doi: 10.1007/978-3-031-84078-4_4.

[6] A. Chizaryfard and E. Karakaya, "The value chain dilemma of navigating sustainability transitions: A case study of an upstream incumbent company," *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 45, pp. 114–131, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.eist.2022.10.002.

[7] N. Soldan Cattani, C. Weinert, V. Mussehl, M. Frieges, and A. Kampker, "Economic and structural challenges of lithium-ion battery recycling in Europe: A stakeholder-based assessment," *Waste Management*, vol. 205, p. 114962, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.wasman.2025.114962.

[8] E. Fan, et al., "Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects," *Chemical Reviews*, vol. 120, no. 14, pp. 7020–7063, Jul. 2020, doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00535.

[9] Q. Dai, J. Spangenberger, S. Ahmed, L. Gaines, J. Kelly, and M. Wang, "EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model," Argonne National Laboratory, IL, USA, Tech. Rep., Apr. 2019, doi: 10.2172/1530874.

A branch & cut algorithm to solve the joint location inventory problem under fill-rate service level constraints and a full backorders approach

1st Cristobal Mora Quijada
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaiso, Chile
cristobal.moraq@sansano.usm.cl

2nd Pablo Escalona
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaiso, Chile
pablo.escalona@usm.cl

***Abstract*—The design of fast moving consumer goods (FMCG) distribution networks under fill-rate service level constraints is typically influenced by the service level α_L, defined as the probability of no stock-outs. However, the most widely used service level metric in distribution networks is the fill-rate, which measures the fraction of demand fulfilled directly from inventory. While high values of α_L (e.g., $\alpha_L \geq 0.9$) imply negligible backorders, neglecting backorders in general can alter the optimal network configuration. In this paper, we present a location-inventory model that explicitly incorporates backorders and fill-rate service level constraints. The problem is formulated as a convex mixed integer nonlinear program (Convex MINLP), and we propose a solution method based on outer-approximation decomposition and branch-and-cut.**

I. Problem Description

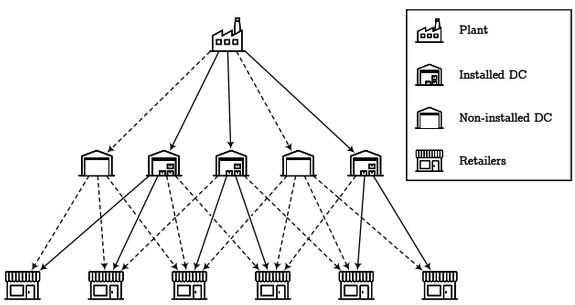


Fig. 1. Supply chain network example.

Figure 1 illustrates a distribution network where a plant supplies installed distribution centers (DCs), and each DC serves a set of retailers. Each retailer is assigned to a single DC (single-source allocation). The Joint Location Inventory Problem (JLIP) seeks to determine the number and locations of DCs, retailer assignments, and inventory policies (order quantities and reorder points) to minimize total cost per time unit.

The plant location, candidates sites for distribution centers and customers locations are known. Let I $(i = 1, \ldots, |I|)$ be the set of retailers where the demand per time unit at each one is assumed independent and normally distributed with μ_i and σ_i^2 the mean demand and variance demand respectively. Let J $(j = 1, \ldots, |J|)$ be the set of candidate sites to install DCs. Each DC j follows a continuous review inventory policy (r, Q), being r the amount of inventory left that triggers the restocking order of Q amount, known as the reorder point, with full-backorders and deterministic lead time (L_j). Whenever the inventory position of a DC drops below a fixed reorder point (r_j) an order quantity of constant size (Q_j) is requested to the plant, this order arrives at a fixed lead time later ($L_j > 0$). Shortages are controlled by a parameter defined as the fraction of demand that can be satisfied using on-hand inventory at any time, this parameter is called $\bar{\beta}$. To determine the location of distribution centers and their allocation to retailers, two variables are created. Let X_j equal 1 if a distribution center is assigned to site j and 0 otherwise, and let Y_{ij} equal 1 if distribution center j is the one that feeds retailer i, 0 otherwise. The main objective is to explore the impact on the assignation variable Y considering the backorders under a fill rate service level constraint ($\bar{\beta}$), comparing the optimal objective function and variables such as locations to be installed, order quantities Q and reorder points r.

A. Average cost per time unit

The objective is to minimize the total cost per time unit at each DC j, which is the sum of: fixed installation cost of each DC, transportation cost per unit from the plant to the DC, transportation cost per unit from each DC j to the retailers, the ordering cost and the holding cost. Then the cost function is:

$$AC_j(Q_j, r_j, X_j, \mathbf{Y}) = f_j X_j + a_j \sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij} + \sum_{i \in I} d_{ij} \mu_i Y_{ij} + S_j \frac{\sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij}}{Q_j} + h_j OH_j^{\infty} \quad (1)$$

In (1), $f_j X_j$ is the fixed cost of opening DC j, $a_j \sum_{i \in I} \mu_i Y_{ij}$ is the plant-to-DC transportation cost, and $\sum_{i \in I} d_{ij} \mu_i Y_{ij}$

is the DC-to-retailer transportation cost. $S_j \frac{\sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}}{Q_j}$ is the ordering cost, and $h_j OH_j^{\infty}$ is the holding cost, where OH_j^{∞} is the average on-hand inventory at DC j. The transportation terms can be combined as $\hat{d}_{ij} := (a_j + d_{ij})\mu_i$.

B. Fill rate service level constraint

Inventory shortages are inherent in systems with uncertain demand. To manage this, we adopt the fill-rate service level introduced by [7], which, under normally distributed demand, corresponds to the probability of maintaining positive inventory at any given time ([8] [2] [5]). This measure effectively controls both the size of backorders and the frequency of stockouts. Let $\beta(Q_j, r_j, \mathbf{Y})$ denote the fill rate at distribution center DC_j under a continuous review (r, Q) policy with full backordering [3], it is given by:

$$\begin{aligned}\beta\left(Q_j, r_j, \mathbf{Y}\right) = 1 - \frac{\sqrt{L_j \sum_{i\in I}\sigma_i^2 Y_{ij}}}{Q_j} \\ \times \left[G\left(\frac{r_j - L_j\sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}}{\sqrt{L_j\sum_{i\in I}\sigma_i^2 Y_{ij}}}\right)\right. \\ \left. -G\left(\frac{r_j + Q_j - L_j\sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}}{\sqrt{L_j\sum_{i\in I}\sigma_i^2 Y_{ij}}}\right)\right]\end{aligned} \tag{2}$$

Where $G(x) = \int_x^{\infty}(v-x)\varphi(v)dv = \varphi(x) - x(1-\Phi(x))$ with $\Phi(x)$ and $\varphi(x)$ the distribution and density functions of the standard normal distribution, respectively. Also note that $H'(x) = -G(x)$. A minimum fill rate $\bar{\beta} \in (0,1)$ is imposed for each DC_j to ensure a desired service level, i.e., $\beta(Q_j, r_j, \mathbf{Y}) \geq \bar{\beta}$ for all $j \in J$.

II. Model Formulation

Based on the previous analysis, the joint location-inventory problem under a continuous review (r, Q) policy with fill-rate service level constraints and normally distributed demand can be formulated as a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model, characterized by nonlinear constraints and a nonlinear objective function. The resulting model, denoted as $\beta-$JLIP, is described as follows:

$$\begin{aligned}\beta\textbf{-JLIP:} \quad \min_{\mathbf{X},\mathbf{Y},\mathbf{r},\mathbf{Q}} \sum_{j\in J}\Bigg\{ & f_j X_j + \sum_{i\in I}\hat{d}_{ij}Y_{ij} \\ & + S_j\left(\frac{\sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}}{Q_j}\right) \\ & + h_j\Bigg(\frac{Q_j}{2} + r_j - L_j\sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij} \\ & \qquad + B\big(Q_j, r_j, \mathbf{Y}_j\big)\Bigg)\Bigg\}\end{aligned} \tag{3}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j\in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{4}$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I,\ \forall j \in J \tag{5}$$

$$\beta\big(Q_j, r_j, \mathbf{Y}\big) \geq \beta \quad \forall j \in J \tag{6}$$

$$r_j \geq L_j \sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij} \quad \forall j \in J \tag{7}$$

$$Q_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{8}$$

$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I,\ \forall j \in J \tag{9}$$

Constraint (4) assigns each retailer to one DC. Constraint (5) allows assignment only to installed DCs. The service level constraint (6) enforces a minimum fill rate. Constraint (7) ensures reorder points cover expected lead-time demand. Constraint (8) requires non-negative order quantities. Constraint (9) enforces binary installation and assignment decisions.

A. Convex reformulation

β-JLIP is a non-convex optimization problem due to the presence of nonlinear and non-convex constraints and objective terms. Specifically, the fill-rate constraint $\beta(Q_j, r_j, \mathbf{Y}) \geq \bar{\beta}$ involves the difference of two nonlinear functions $G(\cdot)$, each depending on both Q_j and r_j in a non-convex manner. A change of variables is introduced. We define a new variable $v_j := r_j - L_j\sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}$, representing the safety stock above the expected demand during the lead time. To address the non-convexity of the β-JLIP model, a convexification approach is adopted.

The following conic variables are introduced:

$$C1_j^2 = \sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}^2 \qquad \forall j \in J \tag{10}$$

$$C2_j^2 = \sum_{i\in I}(\sigma_i Y_{ij})^2 \qquad \forall j \in J \tag{11}$$

$$C1_j \geq 0 \qquad \forall j \in J \tag{12}$$

$$C2_j \geq 0 \qquad \forall j \in J \tag{13}$$

These conic variables are added as relaxed constraints to the β-JLIP model. We observe that the resulting objective function is increasing in $C1_j$, and $C2_j$ is not present in the objective function.

Thus, the β-JLIP model can be reformulated as the following MINLP:

$$\begin{aligned}\beta\textbf{-CQLIP}: \quad \min_{\mathbf{X},\mathbf{Y},\mathbf{v},\mathbf{Q},\mathbf{C1},\mathbf{C2}} \sum_{j\in J}\Bigg\{ & f_j X_j + \sum_{i\in I}\hat{d}_{ij}Y_{ij} + S_j\frac{C1_j^2}{Q_j} \\ & + h_j\Bigg(\frac{Q_j}{2} + v_j + \hat{B}(v_j, Q_j, C2_j)\Bigg)\Bigg\}\end{aligned} \tag{14}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j\in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{15}$$

$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I,\ \forall j \in J \tag{16}$$

$$b(v_j, Q_j, C2_j) \leq 0 \quad \forall j \in J \tag{17}$$

$$C1_j^2 \geq \sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}^2 \quad \forall j \in J \tag{18}$$

$$C2_j^2 \geq \sum_{i\in I}(\sigma_i Y_{ij})^2 \quad \forall j \in J \tag{19}$$

$$v_j,\ Q_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{20}$$

$$C1_j,\ C2_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{21}$$
$$X_j,\ Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I,\ \forall j \in J \tag{22}$$

Constraint (6) of the β-JLIP model, which enforces the fill-rate service level, is reformulated in its convex form using the new variables introduced above. Where $b(v_j, Q_j, C2_j)$ is a convex function representing the fill-rate constraint in terms of the new variables v_j and $C2_j$.

III. Branch & Cut approach

In this work, the proposed branch-and-cut algorithm follows the scheme introduced by [6] for convex MINLP problems. Traditionally, the outer approximation (OA) method alternates between solving a master problem (MIP) and nonlinear subproblems (NLP), generating cuts from infeasible solutions. However, in our approach, an intelligent outer approximation is used: instead of iterating between separate MIP and NLP problems, a single branch-and-cut tree is explored in the master problem. Each time a feasible solution is found for the nonlinear subproblem, bounds are updated, and the search continues within this unique MIP tree.

Thus, the master problem and the primal problems are the following:

Master Problem (NLP)

$$\min_{\substack{\mathbf{X},\mathbf{Y},\mathbf{v},\mathbf{Q},\\ \mathbf{C1},\mathbf{C2},\mathbf{W}}} \sum_{j\in J}\left[f_j X_j + \sum_{i\in I}\hat{d}_{ij}Y_{ij} + W_j\right]$$

$$\text{s.t.} \quad W_j \geq g_j^{(k)} + \nabla g_j^{(k)} \cdot \begin{pmatrix} v_j - v_j^{(k)} \\ Q_j - Q_j^{(k)} \\ C1_j - C1_j^{(k)} \\ C2_j - C2_j^{(k)} \end{pmatrix} \tag{23}$$
$$\forall j \in J,\ \forall k \in \mathcal{K} \tag{24}$$
$$0 \geq b_j^{(k)} + \nabla b_j^{(k)} \cdot \begin{pmatrix} v_j - v_j^{(k)} \\ Q_j - Q_j^{(k)} \\ C2_j - C2_j^{(k)} \end{pmatrix} \tag{25}$$
$$\forall j \in J,\ \forall k \in \mathcal{K} \tag{26}$$
$$\sum_{j\in J} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{27}$$
$$Y_{ij} \leq X_j \quad \forall i \in I,\ \forall j \in J \tag{28}$$
$$C1_j^2 \geq \sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}^2 \quad \forall j \in J \tag{29}$$
$$C2_j^2 \geq \sum_{i\in I}(\sigma_i Y_{ij})^2 \quad \forall j \in J \tag{30}$$
$$v_j, Q_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{31}$$
$$C1_j, C2_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{32}$$
$$X_j, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I,\ \forall j \in J \tag{33}$$

Primal Problem (NLP)

$$\min_{\substack{\mathbf{v},\mathbf{Q},\\ \mathbf{C1},\mathbf{C2}}} \quad \sum_{j\in J}\Bigg[f_j X_j^{(k)} + \sum_{i\in I}\hat{d}_{ij}Y_{ij}^{(k)} + g(v_j, Q_j, C1_j, C2_j)\Bigg]$$

$$\text{s.t.} \quad b(v_j, Q_j, C2_j) \leq 0 \quad \forall j \in J \tag{34}$$
$$C1_j \geq \sqrt{\sum_{i\in I}\mu_i Y_{ij}^{(k)}} \quad \forall j \in J \tag{35}$$
$$C2_j \geq \sqrt{\sum_{i\in I}\sigma_i^2 Y_{ij}^{(k)}} \quad \forall j \in J \tag{36}$$
$$v_j, Q_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{37}$$
$$C1_j, C2_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{38}$$

A. Implementation with Gurobi and Callbacks

The proposed branch-and-cut algorithm is implemented using the Gurobi Optimizer, which provides efficient support for mixed-integer nonlinear programming (MINLP) and allows for custom callback functions. Callbacks are used to dynamically add cutting planes and manage the branching process during the solution of the master problem.

References

[1] Atamtürk, A., Berenguer, G., Shen, Z.J., 2012. A conic integer programming approach to stochastic joint location-inventory problems. Operations Research 60, 2, 366-381.

[2] Axsäter, S., 2015. Inventory control, Vol. 225. Springer.

[3] Axsäter, S., 2006. A simple procedure for determining order quantities under a fill rate constraint and normally distributed lead-time demand. European journal of operational research 174, 1, 480-491.

[4] Daskin, M., Coullard, C., Shen, Z., 2002. An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results. Annals of Operations Research 110, 83-106.

[5] Escalona, P., Angulo, A., Brotcorne, L., Fortz, B., Tapia, P., 2023. Fill-rate service level constrained distribution network design. International Transactions in Operational Research 31, 5-28. doi:https://doi.org/10.1111/itor.13331.

[6] Quesada, I., Grossmann, I. E.: An LP/NLP based branch and bound algorithm for convex MINLP optimization problems. Computers & Chemical Engineering, 16(10-11), 937-947 (1992)

[7] Schneider, H., 1981. Effect of service-levels on order-points or order-levels in inventory models. The International Journal of Production Research 19, 6, 615-631.

[8] Silver, E.A., Pyke, D.F., Peterson, R., et al., 1998. Inventory management and production planning and scheduling, Vol. 3. Wiley New York.

Session N°6 – Track N°4

OR Applications and Artificial Intelligence

Chair: Vásquez, Ó. *(Universidad de Santiago de Chile)*
Place: G6-056
Time: 10:30 – 11:45

Some Theoretical Contributions to the Parallel Additive Manufacturing Machines with Makespan Minimization

Time: 10:30 – 10:45
Authors:

- de Athayde-Prata, B. *(Universidade Federal do Ceará)*
- Vásquez, Ó. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Analítica Prescriptiva y Aprendizaje Reforzado para la Recomendación de Experimentos Maximizando la Eficiencia del Hidrógeno Verde

Time: 10:50 – 11:05
Authors:

- Romero-Silva, C. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Aburto-Lafourcade, L. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Larraín-Benavides, F. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*

Breaking Language Barriers: Optimal Strategies for Interpreter Assignment in a Hospital Setting

Time: 11:10 – 11:25
Authors:

- Shams-Eddin, M. *(George Mason University)*
- El-Hajj, H. *(Santa Clara University)*
- Ahmed, A. *(University of Alabama at Birmingham)*

Una Generalización del Modelo EVSP para Sistemas de Transporte Público con Multiples Tecnologías de Carga

Time: 11:30 – 11:45
Authors:

- Jacobo-Romero, Y. *(Universidad Autonoma de Nuevo León)*
- Ibarra-Rojas, O. *(Universidad Autonoma de Nuevo León)*
- González-Ramírez, R. *(Universidad de los Andes)*
- Huerta-Muñoz, D. *(Universidad Autónoma de Nuevo León)*

Some theoretical contributions to the parallel additive manufacturing machines with makespan minimization

Bruno de Athayde Prata
Department of Industrial Engineering
Federal University of Ceara (UFC)
Fortaleza, Brazil
email: baprata@ufc.br

Óscar C. Vásquez
Department of Industrial Engineering
University of Santiago of Chile (USACH)
Santiago, Chile
email: oscar.vasquez@usach.cl

***Abstract*—This paper addresses some theorectical properties for an additive manufacturing scheduling problem focused on makespan minimization. The studied environment involves both batching decisions (which include a nesting problem) and sequencing decisions, resulting in a complex combinatorial optimization problem. Grouping parts into maximal jobs (respecting machine limits) reduces setups and transforms the problem into an unrelated parallel machine scheduling problem with eligibility constraints. Maximal patterns preserve optimality while narrowing the solution space. The approach balances computational effort and solution quality—either generating all maximal patterns (guaranteeing global optima) or using heuristics (faster but suboptimal). Real-world additive manufacturing constraints make this strategy practical despite combinatorial complexity.**

***Index Terms*—Production Sequencing, Combinatorial Optimization, Mixed-Integer Linear Programming.**

I. Introduction

Among the pillars of Industry 4.0, Additive Manufacturing (AM) stands out as a flexible and customizable production approach. Unlike traditional formative or subtractive manufacturing, AM builds parts layer by layer, with technologies such as Selective Laser Melting enabling the creation of complex metal components without part-specific tooling [13]. This evolution in production methods challenges traditional scheduling models and demands new approaches for planning and control [11], [14].

Recently, several authors have studied parallel machine scheduling problems in additive manufacturing. [15] were the first to address production sequencing in additive manufacturing, proposing a MILP model for a packing problem with adjustable bin sizes. [5] studied a production environment with heterogeneous parallel machines, minimizing costs with a MILP model and two bin packing-related heuristics. [2] also proposed MILP models to minimize makespan, addressing single, identical, and non-identical parallel machine variants. [1] tackled the non-identical parallel machine problem with a Q-learning Iterated Local Search (QILS) algorithm, outperforming previous methods. [6] addressed a batching problem with constrained platforms and setup times, developing a MILP model and an Iterated Greedy algorithm. [7] presented MILP and CP models for makespan minimization, showing that CP models were more effective. Finally, [9] addressed batching and scheduling with complex constraints, proposing a MILP model and a matheuristic.

Based on the literature, a deep theoretical analysis of the additive parallel machines scheduling problem is still missing. In this article, we present some theoretical results for the problem under study. We demonstrate that the integrated batching and sequencing problem can be reduced to the unrelated parallel machines scheduling problem with eligibility constraints and makespan minimization.

This study was financed in part by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), through grants 309755/2021-2, and 407151/2021-4; and by Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), FONDECYT Regular 1250538

II. Problem description

In this work, we adapt the mixed-integer linear programming (MILP) formulation originally proposed by Kucukkoc [2], reformulating some constraints for clarity and introducing additional constraints to enhance model readability.

The indices used in the model are m for machines ($m \in \{1, 2, \ldots, M\}$), j for jobs ($j \in \{1, 2, \ldots, J\}$), and i for parts ($i \in \{1, 2, \ldots, I\}$). The parameters include the time spent to form per unit volume of material on machine m (VT_m), the time spent for powder-layering on machine m (HT_m), and the setup time on machine m (SET_m). Machine-specific parameters also include the production area of the tray (MA_m) and the maximum supported height (MH_m). Part-specific parameters are the height (h_i), area (a_i), and volume (v_i) of part i. Additionally, Ψ is a sufficiently large positive number.

The decision variables are as follows: C_{mj} is the completion time of job j on machine m; C_{max} is the makespan; PT_{mj} is the processing time of job j on machine m; and H_{mj} is the maximum height of parts of job j produced on machine m.

The binary variables are X_{mji}, which is 1 if part i is assigned to job j on machine m and 0 otherwise, and Z_{mj}, which is 1 if job j is allocated to machine m and 0 otherwise.

$$\text{(MILP) minimize} \quad C_{max} \tag{1}$$

subject to

$$C_{max} \geq C_{mj}, \qquad \forall m, j \tag{2}$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in J} X_{mji} = 1, \qquad \forall i \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} a_i X_{mji} \leq MA_m, \qquad \forall m, j \tag{4}$$

$$h_i X_{mji} \leq MH_m, \qquad \forall m, j, i \tag{5}$$

$$\sum_{i \in I} X_{m,j+1,i} \leq \Psi \sum_{i \in I} X_{mji}, \qquad \forall m, j \in \{1, ..., J-1\} \tag{6}$$

$$C_{m,j-1} + PT_{mj} \leq C_{mj}, \qquad \forall m, j \tag{7}$$

$$C_{m0} = 0, \qquad \forall m \tag{8}$$

$$H_{mj} \geq h_i X_{mji}, \qquad \forall m, j, i \tag{9}$$

$$PT_{mj} = SET_m Z_{mj} + VT_m \sum_{i \in I} v_i X_{mji} + HT_m H_{mj}, \qquad \forall m, j \tag{10}$$

$$\sum_{i \in I} X_{mji} \leq \Psi Z_{mj}, \qquad \forall m, j \tag{11}$$

$$C_{max}, C_{mj}, PT_{mj} \geq 0, \qquad \forall m, j \tag{12}$$

$$0 \leq H_{mj} \leq \max_{i \in I} \{h_i\}, \qquad \forall m, j \tag{13}$$

$$X_{mji} \in \{0, 1\}, \qquad \forall m, j, i \tag{14}$$

$$Z_{mj} \in \{0, 1\}, \qquad \forall m, j \tag{15}$$

The objective function (1) is the makespan minimization. Constraint (2) calculates the makespan. Constraint sets (3) imposes that all parts are processes exactly once. Constraint sets (4) guarantess that the machine's capacity is not exceed by the total area of assingned jobs. Constraint sets (5) and (6) are area and height capacity constraints, respectively. Constraint sets (7) imposes that if job j processed on machine m is empty, then their parts cannot be assigned to job j + 1. Constraint set (8) calculates the completion times for each job in each machine. Constraint (9) sets the starting time of the first job to zero. Constraint sets (10) determine the maximum height of the parts produced in each machine. Constraint sets (11) computes the processing times. Constraint sets (12) links the decision variables. Lastly, constraint sets (13), (14), and (15) establish the scope of the decision variables.

III. Problem properties

We can reduce the integrated problem to an unrelated parallel machines scheduling problem with eligibility constraints and makespan minimization, denoted by $R_m \mid M_j \mid C_{\max}$ [16].

Proposition 1. *Let us consider an instance of the additive manufacturing scheduling problem in which each part i has area a_i such that $a_i \geq MA_m/2$ for every machine m on which it can be processed. Then, this problem is a special case of the $R_m \mid M_j \mid C_{\max}$.*

Proof. Since each part i occupies the entire area MA_m of any machine m on which it can be processed, it cannot be grouped with other parts. Therefore, each part i is treated as an individual job j. The machines are unrelated parallel machines because the processing time are calculated as in Equation (10). Since the jobs have characteristics h_i and a_i, and the machines have capacities MH_m and MA_m, a specific set of eligible machines can be defined for each job j, as shown in Equation (16):

$$M_j = \{m \mid a_i \leq MA_m \text{ and } h_i \leq MH_m\}. \tag{16}$$

□

The batching subproblem can be transformed during a preprocessing stage. Multiple batch patterns may be generated based on the nesting subproblem. The bottleneck of the process lies in the tray capacity of the machines, which imposes restrictions on batch pattern generation.

Enumerating job patterns without considering the batching subproblem allows the formulation of a standard unrelated parallel machines scheduling problem. Given the characteristics of real-world additive manufacturing scenarios, the test instances generated by this enumeration procedure may be relatively small when applied to unrelated parallel machine settings. Fanjul-Peyro and Ruiz [17] demonstrated that MILP models are capable of solving test instances involving dozens of machines and thousands of jobs.

Job generation can follow either an exhaustive or heuristic approach. If only a subset of all feasible patterns is generated, there is no guarantee that the global optimal solution will be found. On the other hand, if all possible job patterns are considered, the model has access to the complete solution space, potentially enabling the identification of the global optimum, albeit often at a significantly higher computational cost.

The preprocessing stage can be optimized by generating only maximal patterns. A pattern is defined as maximal concerning the m-th machine if no additional part can be included without exceeding the machine's capacity. Araujo et al. [18] demonstrated in a related cutting and sequencing problem that restricting the model to use only maximal patterns does not alter the set of optimal solutions. Here we adpat this result for the variant under study.

Theorem 1. *Restricting the additive manufacturing scheduling problem to use only maximal patterns does not modify its set of optimal solutions.*

Proof. Let J be a non-maximal pattern job assigned to machine m. Construct a maximal pattern job J' by adding parts to J until no more fit. Replacing J with J' preserves feasibility and improves resource utilization. Since this transformation

cannot increase the makespan, optimal solutions must use maximal patterns. □

Taking the previous notation into account, we can define the remaining indices, parameters, and decision variables for the $R_m \mid M_j \mid C_{\max}$. The model uses the set $A \subseteq M \times N$ to represent eligible machine-job assignments, where $(i, j) \in A$ indicates that job j can be processed on machine i. The parameter p_{ij} denotes the processing time of job j on machine i, defined only for eligible assignments. The binary decision variable y_{ij} is equal to 1 if job j is assigned to machine i, and 0 otherwise.

$$\text{Minimize} \quad C_{\max} \tag{17}$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{\substack{i \in M \\ (i,j) \in A}} y_{ij} = 1 \qquad \forall_j \tag{18}$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ (i,j) \in A}} y_{ij} \cdot p_{ij} \leq C_{\max} \qquad \forall_i \tag{19}$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \qquad \forall (i, j) \in A \tag{20}$$

If all maximal patterns are generated and all associated $R_m \mid M_j \mid C_{\max}$ subproblems are solved, then the global optimal solution corresponds to the smallest makespan among all subproblems. Since the $R_m \mid M_j \mid C_{\max}$ problem is relatively easy to solve for dozens of jobs and a small number of machines, this strategy is feasible for instances arising in real-world environments.

The batching subproblem can be transformed during a preprocessing stage. Multiple batch patterns may be generated based on the nesting subproblem. The bottleneck of the process lies in the tray capacity of the machines, which imposes restrictions on batch pattern generation.

IV. Final remarks

This paper considers several theoretical properties of a parallel additive manufacturing scheduling problem, which arises in the context of 3D printers within the Industry 4.0 environment. The specific variant under study is composed of two stages. The first stage involves a nesting problem to build batches from the parts to be printed. The second stage consists of a sequencing problem that aims to allocate these jobs to the available printers.

As the main contribution of this paper, we show that the integrated problem can be reduced to an unrelated parallel machine scheduling problem with eligibility constraints and makespan minimization. This reduction is achieved through a preprocessing stage, in which jobs are created based on a pattern enumeration scheme. The generation process can be heuristic or exhaustive, covering all feasible patterns. Furthermore, we demonstrate that only maximal patterns need to be considered, without any loss of optimality.

Future studies could compare the results obtained by the MILP model for the integrated problem with those of the $R_m \mid M_j \mid C_{\max}$ formulation. Computational experiments should evaluate the impact of the pattern generation process on the quality of the solutions found. Another research avenue involves the development of dominance rules for the additive manufacturing scheduling problem under study.

References

[1] M. Alicastro, D. Ferone, P. Festa, S. Fugaro, and T. Pastore, "A reinforcement learning iterated local search for makespan minimization in additive manufacturing machine scheduling problems," *Comput. Oper. Res.*, vol. 131, p. 105272, 2021.

[2] I. Kucukkoc, "MILP models to minimise makespan in additive manufacturing machine scheduling problems," *Comput. Oper. Res.*, vol. 105, pp. 58–67, 2019.

[3] J. M. Framinan, P. Perez-Gonzalez, and V. Fernandez-Viagas, "An overview on the use of operations research in additive manufacturing," *Ann. Oper. Res.*, pp. 1–36, 2022.

[4] X. Li, Y. Huang, Q. Tan, and H. Chen, "Scheduling unrelated parallel batch processing machines with non-identical job sizes," *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 12, pp. 2983–2990, 2013.

[5] Q. Li, I. Kucukkoc, and D. Z. Zhang, "Production planning in additive manufacturing and 3D printing," *Comput. Oper. Res.*, vol. 83, pp. 157–172, 2017.

[6] K.-C. Ying and S.-W. Lin, "Minimizing makespan in two-stage assembly additive manufacturing: A reinforcement learning iterated greedy algorithm," *Appl. Soft Comput.*, p. 110190, 2023.

[7] E. Cakici, I. Kucukkoc, and M. Akdemir, "Advanced constraint programming formulations for additive manufacturing machine scheduling problems," *J. Oper. Res. Soc.*, pp. 1–16, 2024.

[8] B. Yuan and W. Cui, "Optimization of machine schedules and vehicle routes in the mobile additive manufacturing mode," *Int. J. Prod. Res.*, pp. 1–17, 2024.

[9] B. Zipfel, R. M'Hallah, and U. Buscher, "Scheduling for additive manufacturing with two-dimensional packing and incompatible items," *Omega*, vol. 129, p. 103139, 2024.

[10] I. Kucukkoc, "Scheduling of distributed additive manufacturing machines considering carbon emissions," *Int. J. Optim. Control: Theor. Appl. (IJOCTA)*, vol. 14, no. 1, pp. 20–31, 2024.

[11] R. Parvanda and P. Kala, "Trends, opportunities, and challenges in the integration of the additive manufacturing with Industry 4.0," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 8, no. 3, pp. 587–614, 2023.

[12] Y. Yin, K. E. Stecke, and D. Li, "The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 1-2, pp. 848–861, 2018.

[13] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Mater. Today*, vol. 21, no. 1, pp. 22–37, 2018.

[14] Z. Jiang, S. Yuan, J. Ma, and Q. Wang, "The evolution of production scheduling from Industry 3.0 through Industry 4.0," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 60, no. 11, pp. 3534–3554, 2022.

[15] J. P. N. Freens, I. J. B. F. Adan, A. Y. Pogromsky, and H. Ploegmakers, "Automating the production planning of a 3D printing factory," in *2015 Winter Simulation Conf. (WSC)*, 2015, pp. 2136–2147.

[16] P. Perez-Gonzalez, V. Fernandez-Viagas, M. Z. García, and J. M. Framinan, "Constructive heuristics for the unrelated parallel machines scheduling problem with machine eligibility and setup times," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 131, pp. 131–145, 2019.

[17] L. Fanjul-Peyro and R. Ruiz, "Size-reduction heuristics for the unrelated parallel machines scheduling problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 38, no. 1, pp. 301–309, 2011.

[18] K. A. G. Araújo, T. O. Bonates, B. A. Prata, and A. R. Pitombeira-Neto, "Heterogeneous prestressed precast beams multiperiod production planning problem: modeling and solution methods," *Top*, vol. 29, pp. 660–693, 2021.

Analítica Prescriptiva y Aprendizaje Reforzado para la Recomendación de Experimentos Maximizando la Eficiencia del Hidrógeno Verde

1st Carolina Matilda Romero Silva
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
carolromero@alumnos.uai.cl

2nd Luis Aburto Lafourcade
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
luis.aburto@uai.cl

3rd Felipe Larraín Benavides
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
felipe.larrain@uai.cl

***Abstract*—La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis se perfila como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, aunque su viabilidad económica se ve limitada por la baja eficiencia y los altos costos de experimentación. En este contexto, el aprendizaje reforzado (RL), scheduling y los modelos de Multi Armed Bandit tal como Thompson sampling, surgen como enfoques prometedores para optimizar la operación bajo incertidumbre.**

En esta investigación se utilizó el algoritmo algoritmo del tipo Multi-Armed Bandit (MAB) contextual, que permite tomar decisiones operativas (encendido, apagado, standby) en función de las condiciones meteorológicas. Dichas condiciones son representadas mediante etiquetas discretas obtenidas a partir de un análisis de clusterización sobre variables ambientales como la radiación solar, temperatura y humedad, lo que permite capturar el contexto de operación sin requerir datos continuos complejos.

Además, se incorpora un modelo de scheduling para planificar estratégicamente los experimentos, maximizando la eficiencia energética al identificar momentos óptimos de operación según la disponibilidad de energía renovable.

Pese a los avances, persiste una brecha en la integración de analítica prescriptiva y aprendizaje adaptativo para la recomendación dinámica de configuraciones experimentales. Esta investigación propone un enfoque integrado basado en RL tipo multi-armed y programación lineal mixta, orientado a maximizar la eficiencia del proceso y reducir costos experimentales.

***Index Terms*—Hidrógeno verde, aprendizaje reforzado, Scheduling, analítica prescriptiva, optimización experimental, sostenibilidad energética.**

I. Introducción

La transición hacia una matriz energética sostenible ha impulsado el desarrollo de tecnologías limpias, entre las cuales el hidrógeno verde destaca como un vector energético prometedor. Producido mediante electrólisis del agua usando energía renovable, permite generar hidrógeno sin emisiones directas de carbono. Sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta barreras técnicas y económicas, como la baja eficiencia del proceso y los altos costos experimentales.

En este contexto, el aprendizaje automático ha demostrado ser una herramienta eficaz para optimizar sistemas energéticos. En particular, el aprendizaje reforzado (RL) ha sido exitosamente aplicado a entornos de decisión secuencial, como el control de procesos industriales. Dentro de este marco, los algoritmos tipo multi-armed bandit permiten seleccionar entre acciones discretas (encendido, standby, apagado) en función de recompensas observadas. En esta investigación, se emplea la estrategia Thompson Sampling para aprender decisiones operativas óptimas bajo distintos escenarios meteorológicos.

El objetivo es desarrollar un enfoque que integre técnicas de RL y scheduling determinista para recomendar configuraciones experimentales que maximicen la eficiencia energética y reduzcan costos, facilitando la adopción del hidrógeno verde a escala industrial.

II. Estado del arte

La electrólisis del agua se posiciona como la principal tecnología para la producción de hidrógeno verde, gracias a su compatibilidad con energías renovables como la solar y la eólica. No obstante, enfrenta limitaciones técnicas relevantes, como el alto consumo energético y el desgaste de componentes, especialmente los electrodos. Estudios recientes han evaluado tecnologías maduras como la electrólisis alcalina y la de membrana de intercambio protónico (PEM), así como alternativas emergentes como las celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC), que presentan mejoras en eficiencia operativa [1][2].

Paralelamente, el uso de técnicas de aprendizaje automático ha ganado relevancia para optimizar el desempeño de estos sistemas. Modelos como XGBoost y redes neuronales han demostrado capacidad para predecir el rendimiento de los electrolizadores bajo distintos escenarios operativos, mejorando la toma de decisiones en contextos complejos [3].

En este marco, el aprendizaje por refuerzo (RL) ha surgido como una herramienta poderosa para controlar sistemas energéticos en tiempo real, especialmente bajo condiciones variables de generación renovable [4]. Dentro de esta categoría, los algoritmos tipo multi-armed bandit permiten seleccionar entre acciones discretas (como encendido, apagado o standby) según las recompensas observadas en cada contexto. En particular,

Thompson Sampling ha destacado por su eficiencia al balancear exploración y explotación, mostrando buenos resultados en aplicaciones con incertidumbre ambiental, como la gestión de electrolizadores solares [7][8].

III. Análisis exploratorio de datos meteorológicos

A. Clasificación de condiciones ambientales para la optimización del rendimiento energético

Durante el desarrollo del estudio se realizó un análisis detallado de los datos experimentales provenientes de paneles solares, considerando variables como la radiación global horizontal (GHI), radiación UVA, temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del panel. Los datos fueron segmentados en intervalos diurnos (de 07:00 a 19:00) y nocturnos (de 19:00 a 07:00 del día siguiente), calculando para cada segmento medidas estadísticas como la media y la desviación estándar. Posteriormente, se aplicó el algoritmo de *K-means clustering* para clasificar los días y noches en distintos grupos representativos de condiciones meteorológicas (como días soleados, nublados o húmedos), evaluando distintas cantidades de clústeres para identificar patrones robustos. El propósito de este análisis es entender y predecir las variaciones en el comportamiento de los paneles solares, que constituyen la fuente principal de energía para el proceso de producción de hidrógeno verde. A partir de esta clasificación, se busca orientar la selección de condiciones experimentales representativas, con el fin de diseñar mejores estrategias de predicción del comportamiento energético. Esto permitirá, en etapas posteriores, implementar técnicas de optimización que mejoren la eficiencia y rendimiento del proceso completo de producción de hidrógeno.

B. Scheduling MILP del Electrolizador

Como parte del enfoque propuesto, se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para representar el scheduling operativo del electrolizador, considerando tres estados discretos: apagado, standby y producción. El modelo incorpora restricciones de transición entre estados, tiempos mínimos de operación y penalizaciones por encendidos frecuentes. Fue implementado en Julia utilizando JuMP y resuelto con HiGHS, permitiendo identificar estrategias óptimas de operación frente a perfiles variables de generación solar, con tiempos de cómputo adecuados para simulaciones diarias.

Los resultados iniciales muestran que el scheduling se adapta eficazmente a condiciones climáticas representadas por clústeres típicos de días, y constituye una etapa fundamental para el posterior entrenamiento del agente de aprendizaje reforzado. En conjunto con el análisis de datos y el modelo MAB, esta estrategia apunta a construir un sistema inteligente capaz de maximizar la producción de hidrógeno, reducir costos y mejorar la eficiencia global del proceso. Como trabajo futuro, se contempla el uso de modelos explicables como SHAP [6] para interpretar las decisiones del sistema y fortalecer la transparencia de los modelos aplicados a energías renovables.

C. Resultados del algoritmo Thompson Sampling

La implementación del algoritmo Thompson Sampling permitió identificar de forma adaptativa las mejores decisiones operativas (ON, STANDBY u OFF) para el electrolizador según el tipo de día previamente clasificado. A lo largo de los episodios simulados, el agente fue ajustando sus estimaciones de eficiencia para cada acción, convergiendo hacia políticas que maximizan la producción de hidrógeno en días con alta radiación solar y reducen pérdidas en condiciones desfavorables. Este enfoque demostró ser eficaz para reducir la exploración innecesaria y acelerar la convergencia hacia estrategias óptimas bajo incertidumbre climática, adaptando dinámicamente la operación del sistema con base en datos históricos.

TABLE I
MATRIZ DE DECISIÓN: DISTRIBUCIÓN DE ACCIONES POR TIPO DE DÍA (EN %)

Clúster (Tipo de día)	**OFF (%)**	**ON (%)**	**STANDBY (%)**
0 – Muy soleado	6.85	71.23	21.92
1 – Lluvioso	24.14	41.38	34.48
2 – Parcialmente nublado	13.43	56.72	29.85
3 – Soleado	6.15	75.38	18.46
4 – Sol débil	9.52	58.33	32.14
5 – Nublado / Húmedo	20.27	28.38	51.35

La tabla muestra la proporción de veces que el agente seleccionó cada acción operativa (OFF, ON, STANDBY) en función del tipo de día clasificado de los datos mediante clustering a modo de ejemplo. Se observa que en días muy soleados (Clúster 0 y 3) predomina la acción ON, mientras que en días nublados o lluviosos (Clúster 1 y 5) aumentan las decisiones de apagado o standby, evidenciando el aprendizaje contextual del modelo.

References

[1] J. García, M. Soto, y F. López, "Modelado de celdas AEL y PEMEL en condiciones variables," *Revista de Energías Renovables*, vol. 18, no. 2, pp. 85–97, 2024.

[2] B. Hai, Y. Zhang, y L. Wu, "Deep learning optimization of hybrid energy systems for hydrogen generation," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 133–144, 2023.

[3] H. Wang *et al.*, "XGBoost-based prediction and optimization of SOEC performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 14, pp. 5701–5712, 2023.

[4] R. Sutton y A. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*, 2nd ed. MIT Press, 2018.

[5] G. Karniadakis *et al.*, "Physics-informed machine learning," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, pp. 422–440, 2021.

[6] S. Lundberg y S. Lee, "A unified approach to interpreting model predictions," en *Proc. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2017, pp. 4765–4774.

[7] S. Agrawal and N. Goyal, "Analysis of Thompson Sampling for the multi-armed bandit problem," in *Proc. 25th Annual Conference on Learning Theory (COLT)*, 2012, pp. 39.1–39.26.

[8] T. Lattimore and C. Szepesvári, *Bandit Algorithms*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2020. [Online]. Available: https://tor-lattimore.com/downloads/book/book.pdf

Breaking Language Barriers: Optimal Strategies for Interpreter Assignment in a Hospital Setting

1st Marwan Shams Eddin
Department of Systems Engineering and Operations Research
George Mason University
Fairfax, USA
mshamsed@gmu.edu

2nd Hussein El Hajj
Department of Information Systems and Analytics
Santa Clara University
Santa Clara, USA
helhajj@scu.edu

3rd Abdulaziz Ahmed
Department of Health Services Administration
The University of Alabama at Birmingham
Birmingham, USA
aahmed2@uab.edu

***Abstract*—Hospitals face persistent challenges in providing timely, equitable language access for patients with limited English proficiency. We develop a deterministic mixed-integer linear program that schedules medical interpreters on a continuous time horizon while enforcing language qualifications, emergency coverage, labor rules for full-time, part-time, and consultant interpreters, and sequencing with travel. In a realistic case study that include a random assignment baseline, the deterministic model reduced interpreter-related delays and total scheduling costs by more than 32%.**

***Index Terms*—interpreter scheduling; mixed-integer programming; healthcare operations; language access**

I. Introduction

Language access is foundational to safe and equitable care delivery. In the United States, about 68 million people, 21% of the population, speak a language other than English at home [18], and at least 25.6 million are identified as having limited English proficiency (LEP) [7]. LEP patients, many of whom are racial and ethnic minorities, are disproportionately admitted to lower-quality hospitals even when higher-quality options are nearby [13]. Communication barriers contribute to longer stays, readmissions, and preventable adverse events [2], and inadequate interpreting has been implicated in serious malpractice cases, including death or permanent harm [4, 12]. High-quality interpretation improves preventive care uptake [6], diagnostic accuracy and treatment adherence [8], and hospitals are legally obligated to provide meaningful language access under Title VI of the Civil Rights Act and related guidance [5, 20].

Despite these clinical and legal imperatives, hospitals struggle to provide timely in-person interpretation at scale. Staffing models must coordinate distinct labor categories, full-time, part-time, and on-call consultants, with different cost structures and working-hour rules; match interpreters to patients across many languages and qualifications; and schedule service on a continuous time horizon while accounting for nontrivial travel between locations. Emergency encounters require immediate coverage, whereas routine appointments ideally begin on time but may tolerate short delays. In practice, many organizations rely on ad hoc dispatching or coarse, slot-based templates that underutilize staff in one area while incurring avoidable overtime or consultant charges in another, which can delay or preclude services for LEP patients.

This paper focuses primarily on a deterministic scheduling model because most coordination is a day ahead planning task. Given the appointment book and historically typical service durations, the central challenge is to construct a feasible and cost-effective schedule that respects language qualifications, travel and sequencing, and labor rules that distinguish regular hours from overtime. A deterministic mixed-integer linear program (MILP) captures these dominant structural features in a compact, continuous-time formulation. Such a model provides operational transparency by specifying who serves whom, when, and in what sequence; supports budget control and policy testing by representing regular time, overtime activation, travel, and consultant minimums directly in the objective; and remains computationally tractable at planning scales.

We therefore develop a deterministic MILP that schedules interpreters on a continuous timeline, enforces language-qualification compatibility, models labor categories and rules, and incorporates travel times and costs alongside service-time sequencing. Patient-centered priorities enter through a utility minus delay penalty objective that guarantees coverage for all emergencies while discouraging delays for routine appointments. Recognizing that service times can exceed their estimates, we also present a robust counterpart that preserves feasibility under adverse realizations. The robustification serves as a safeguard and does not change the planner's primary deterministic workflow.

Our contributions are twofold. First, we provide an implementation-ready, continuous-time MILP for interpreter scheduling that integrates hiring and activation decisions with patient-to-interpreter assignment and sequencing, while re-

flecting overtime activation and consultant minimum billing. Second, we articulate an equity-aware objective with explicit patient priorities and realistic cost components, enabling institutions to study and tune policy trade-offs between timely, equitable service and operational expenditure. Using simulated yet representative instances, we find that the deterministic model substantially reduces interpreter-related delays and total scheduling costs compared with ad hoc assignment, and that the robust variant offers additional protection against service-time overruns with minimal feasibility violations.

The remainder of the paper introduces the modeling framework, details the deterministic and robust formulations, and reports computational experiments that quantify performance and illustrate policy trade-offs. We conclude with implementation guidance and directions for future research.

II. Model

We propose a mixed-integer linear programming (MILP) model to optimize hospital interpreter scheduling by explicitly considering patient priorities, interpreter classifications (full-time, part-time, and consultants), language qualifications, travel costs between patient locations, and appointment timings. The model balances patient service quality, maximizing timely interpreter assignments and minimizing delays, with efficient utilization of interpreter resources, including fixed hiring costs and overtime expenses.

The objective function is formulated as a weighted sum combining three key components: (i) the utility of serving patients, differentiated by patient type and priority (e.g., routine versus emergency), (ii) penalties incurred for patient delays or unmet needs, and (iii) operational costs of interpreting services, including fixed hiring costs, variable service costs, travel costs, and overtime compensation. This formulation allows hospitals to systematically evaluate trade-offs between patient care quality and interpreter resource expenditures.

The model incorporates several critical operational constraints:

- **Interpreter availability constraints** ensure that assignments respect interpreters' contracted working hours, with explicit handling of overtime for full-time interpreters.
- **Emergency patient constraints** guarantee that all emergency patients are promptly assigned interpreters, reflecting their critical and unpredictable nature.
- **Sequencing and travel constraints** ensure interpreters have sufficient time to travel between patient locations and prevent overlapping appointments.
- **Compatibility constraints** ensure interpreters are only assigned to patients they are qualified to serve, based on language skills and patient-specific requirements.
- **Logical assignment constraints** maintain feasible scheduling sequences, linking assignments to hiring decisions and interpreter selection.

To address service time uncertainty, we formulate both a deterministic model, assuming known service durations, and a robust optimization model that hedges against worst-case realizations of service time variability. The robust formulation ensures feasible and reliable schedules even when actual service times exceed initial estimates, enhancing operational resilience. Overall, our models provide a structured approach for hospitals to improve interpreter scheduling efficiency, ensure equitable access for limited English proficiency patients, and manage operational costs effectively.

III. Case Study

We design a realistic case study to evaluate the proposed deterministic scheduler in a medium-to-large U.S. hospital. The instance reflects (i) the daily mix of interpreter requests across major language groups, (ii) typical encounter durations when professional interpretation is used, (iii) labor categories and compensation practices including overtime and consultant minimums, and (iv) intra-hospital travel. All parameters are sourced from public data or established practice and, where necessary, calibrated conservatively with justification.

We consider a single day (08:00–18:00) of operations in a 350-bed urban academic hospital with multiple outpatient clinics and an emergency department (ED). Requests arrive for in-person interpretation across five prevalent non-English language groups in U.S. hospitals: Spanish, Chinese (incl. Mandarin/Cantonese), Vietnamese, Arabic, and ASL. Language proportions are informed by ACS language-use statistics, where Spanish is the dominant non-English language nationally, followed by Chinese, Tagalog, Vietnamese, Arabic and others [1, 17, 19]. Specifically, we set baseline daily demand shares: Spanish 60%, Chinese 12%, Vietnamese 8%, Arabic 8%, ASL 12%. The overall share for Spanish and Chinese is consistent with national ACS reporting (Spanish ˜62% of non-English speakers; Chinese among the next-most-common) [1, 17].

A. Baseline Numbers (Summary)

Unless stated otherwise, the baseline case uses:

- Planning horizon of 10 hours (08:00–18:00); 48 encounters per day on average: 12 emergency department visits (Poisson arrivals at rate 1.2 per hour) and 36 scheduled outpatient visits.
- Language distribution: Spanish 60%, Chinese 12%, Vietnamese 8%, Arabic 8%, and ASL 12% [1, 17].
- Service times: emergency department 60 minutes; outpatient initial 45 minutes; outpatient follow-up 30 minutes [3, 15].
- Travel times between locations: 0, 5, or 10 minutes; travel cost: \$2 per 5-minute move [11, 14].
- Workforce: 8 full-time interpreters (8 hours each), 6 part-time interpreters (4 hours each), and up to 10 consultants.
- Costs: \$285 per full-time interpreter per day; overtime \$43 per hour [16, 21]; part-time \$32 per hour; consultant \$80 per hour with a 2-hour minimum [9, 10]; part-time activation \$25 per day; consultant activation \$10 per day.
- Priorities: patient utilities and delay penalties as specified above; emergency coverage is mandatory.

B. Results Summary

We compared the deterministic optimization model to current practice on the case-study day. The optimization schedule served all emergency patients, while current practice left one emergency unserved. In terms of the objective, utility minus delay penalties, the optimization achieved a total value of 5160 compared with 3310 under current practice, an improvement of about 56%.

Operationally, both schedules prioritize full time interpreters, and refer to consultants only when necessary. The optimization, however, sequences work and travel more effectively, which reduces delays for high priority encounters and avoids unnecessary overtime and consultant hours. The deterministic MILP maximizes a patient-centered objective that combines service utility and delay penalties while accounting for labor and travel costs. Relative to ad hoc dispatch, our results show substantial gains: the optimization served all emergencies and improved the overall objective by roughly 56%. In broader experiments that include a random assignment baseline, the deterministic MILP significantly improves operational efficiency, reducing interpreter-related delays and overall scheduling costs by more than 32% compared to random assignment.

References

[1] S. Dietrich and E. Hernandez. Language use in the united states: 2019. American Community Survey Reports ACS-50, U.S. Census Bureau, September 2022. Also available as PDF.

[2] C. Divi, R. Koss, S. Schmaltz, and J. Loeb. Language proficiency and adverse events in us hospitals: a pilot study. *International Journal for Quality in Health Care*, 19(2):60–67, 2007.

[3] M. J. Fagan, J. A. Diaz, S. E. Reinert, C. N. Sciamanna, and D. M. Fagan. Impact of interpretation method on clinic visit length. *Journal of General Internal Medicine*, 18(8):634–638, 2003. doi: 10.1046/j.1525-1497.2003.20701.x.

[4] G. Flores. The impact of medical interpreter services on the quality of health care: A systematic review. *Medical Care Research and Review*, 62(3):255–299, 2005.

[5] B. Jacobs, A. Ryan, K. Henrichs, and B. Weiss. Medical interpreters in outpatient practice. *Annals of Family Medicine*, 16(1):70, 2018.

[6] E. Jacobs, D. Shepard, J. Suaya, and E. Stone. Overcoming language barriers in health care: costs and benefits of interpreter services. *American Journal of Public Health*, 94(5):866–869, 2004.

[7] G. Kim, C. Aguado Loi, D. Chiriboga, Y. Jang, P. Parmelee, and R. Allen. Limited english proficiency as a barrier to mental health service use: a study of latino and asian immigrants with psychiatric disorders. *Journal of Psychiatric Research*, 45(1):104–110, 2011.

[8] L. Ku and G. Flores. Pay now or pay later: providing interpreter services in health care. *Health Affairs*, 24(2): 435–444, 2005.

[9] LanguageLine Solutions. Why onsite interpreters charge a two-hour minimum, November 2017.

[10] Migration Policy Institute. Best practice recommendations for hospital-based interpreter services, 2006. Includes discussion of two-hour minimums for freelance/contract interpreters.

[11] R. Mohebbifar, E. Hasanpoor, M. Mohseni, M. Sokhanvar, O. Khosravizadeh, and H. Mousavi Isfahani. Outpatient waiting time in health services and teaching hospitals: A case study in iran. *Global Journal of Health Science*, 6(1):172–180, 2013. doi: 10.5539/gjhs.v6n1p172.

[12] K. Quan and J. Lynch. The high costs of language barriers in medical malpractice, 2010. Pages 1–24.

[13] K. Sliwinski, S. Vangala, A. Fernandez, and D. Nguyen. Mapping segregation patterns of hospital care among patients with limited english proficiency. *Journal of Immigrant and Minority Health*, 26(6):1113–1116, 2024.

[14] G.-B. B. Subburaman, J. R. Munavalli, T. Ravilla, H. Mertens, C. Webers, S. V. Rao, and F. van Merode. Managing outpatient cycle times in hospitals using integrated closed-loop approaches. *Health Services Insights*, 16:11786329221145858, 2023. doi: 10.1177/11786329221145858.

[15] P. Torresdey, J. Chen, and H. P. Rodriguez. Patient time spent with professional medical interpreters and the care experiences of patients with limited english proficiency. *Journal of Primary Care & Community Health*, 15:21501319241264168, 2024. doi: 10.1177/21501319241264168.

[16] U.S. Bureau of Labor Statistics. Occupational outlook handbook: Interpreters and translators, 2025. Median annual wage data reported for May 2024.

[17] U.S. Census Bureau. American community survey table b16001: Language spoken at home by ability to speak english for the population 5 years and over (acs 1-year estimates, 2022), 2022.

[18] US Census Bureau. Languages we speak in united states, 2022. Accessed: 2025-06-30.

[19] U.S. Census Bureau. New data on detailed languages spoken at home and the ability to speak english: 2017–2021. Press release CB25-TPS.40, June 2025.

[20] US Department of Justice, Civil Rights Division. Title vi of the civil rights act of 1964. Accessed: 2025-06-30.

[21] U.S. Department of Labor, Wage and Hour Division. Fact sheet #54: The health care industry and calculating overtime pay, 2009.

Una generalización del modelo EVSP para sistemas de transporte público con multiples tecnologías de carga

1st Yulitza Yazmi Jacobo-Romero
Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas
Universidad Autonoma de Nuevo León
México
yulitza.jacoboro@uanl.edu.mx

2nd Omar Jorge Ibarra-Rojas
Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas
Universidad Autonoma de Nuevo León
México
omar.ibarrarj@uanl.edu.mx

3rd Rosa Guadalupe González-Ramírez
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Andes
Chile
rgonzalez@uandes.cl

4th Diana Lucia Huerta-Muñoz
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autonoma de Nuevo León
México
dianahuerta@yalma.fime.uanl.mx

***Abstract*—El transporte público bien planificado puede incentivar el uso de energías limpias y reducir las emisiones urbanas a través de una optimización integral de la infraestructura, las rutas, la flota y los procesos de recarga. En este trabajo se presenta una generalización del problema de programación de vehículos eléctricos (Electric Vehicle Scheduling Problem, EVSP) aplicada a sistemas de transporte público heterogéneos, incorporando decisiones estratégicas como la localización de estaciones de carga entre modalidades de carga en depósito y en ruta. Asimismo, se considera explícitamente la posibilidad de carga nocturna con el fin de garantizar que la flota comience cada jornada completamente recargada. Se propone una formulación matemática no lineal con variables enteras, complementada con una matheurística que combina este modelo con algoritmos heurísticos. La optimización se guía por 4 objetivos principales: minimizar el tamaño de la flota, los costos de infraestructura de carga, los costos asociados a recargas durante trayectos no comerciales (tales como viajes de reposicionamiento o viajes exclusivos para realizar carga) y la minimización de la carga que se debe de reallizar durante la noche. El modelo integra restricciones relacionadas con la capacidad de las estaciones, la autonomía de los vehículos y los tiempos de espera, con el fin de lograr un equilibrio entre eficiencia operativa, costos y calidad del servicio. La matheurística propuesta, permite abordar casos reales con tiempos de cómputo significativamente menores, manteniendo una buena calidad de las soluciones obtenidas.**

***Index Terms*—Programación de vehículos, electromovilidad, recargas en ruta, Infraestructura de carga, Transporte público**

I. Introducción

El transporte público, cuando está correctamente planificado, representa una alternativa sostenible frente al uso generalizado de vehículos particulares. Esta modalidad de movilidad urbana no solo permite un uso más eficiente del espacio público y una reducción significativa de la congestión vehicular, sino que también facilita la adopción de tecnologías limpias y el aprovechamiento de energías renovables. En este contexto, la transición hacia flotas de autobuses eléctricos se ha consolidado como una estrategia clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y avanzar hacia el cumplimiento de objetivos climáticos globales. No obstante, esta transición implica nuevos desafíos logísticos y operativos, ya que los vehículos eléctricos presentan limitaciones inherentes, como su autonomía restringida, la duración de los procesos de carga y la necesidad de contar con una infraestructura de recarga adecuada y estratégicamente ubicada. Estas complejidades se intensifican en redes reales de transporte público que involucran múltiples depósitos, líneas con distintas configuraciones (bidireccionales o circulares), diversos tipos de viajes (comerciales y no comerciales) y tecnologías de carga heterogéneas, como la carga en depósito y la carga en ruta (*oppcharge*), que permite la recarga del autobús durante la operación comercial.

En respuesta a estas necesidades, este trabajo propone una generalización del problema de programación de vehículos eléctricos, conocido como Electric Vehicle Scheduling Problem (EVSP), adaptado a sistemas de transporte público heterogéneos. La propuesta integra tanto decisiones operativas como estratégicas, e incorpora variables relacionadas con la asignación de vehículos, la secuencia de viajes, la planificación de acciones de carga, y la localización de estaciones de recarga. La red considerada incluye líneas bidireccionales y circulares, así como múltiples tecnologías de carga, permitiendo una combinación flexible de operaciones. En este contexto, se contempla la realización de viajes no comerciales, los cuales se generan principalmente en dos situaciones: cuando una línea opera desde un cabezal ubicado fuera del depósito y es necesario realizar un desplazamiento para cargar, o cuando se requiere reposicionar un vehículo hacia el inicio de su siguiente viaje asignado. Estos trayectos implican costos

adicionales, por lo que uno de los objetivos centrales es su minimización.

Para abordar este problema, se plantea una formulación matemática de naturaleza no lineal con variables enteras, la cual busca simultáneamente minimizar el tamaño total de la flota necesaria, reducir los costos de infraestructura de carga, minimizar los costos operativos asociados a las acciones de recarga, especialmente aquellas que involucran viajes no comerciales y por su puesto maximizar la batería con la que el bus ttermina al finalizar el día. Un componente clave del modelo es la inclusión de una estrategia de carga nocturna: se procura que al finalizar la operación diaria, los vehículos conserven suficiente carga residual que les permita completar una recarga total durante el periodo nocturno, haciendo uso eficiente de la capacidad disponible en los depósitos. Esta estrategia permite evitar inversiones costosas en estaciones de alta potencia y garantiza la viabilidad técnica y económica del sistema a largo plazo. En conjunto, el modelo propuesto permite capturar de manera realista las complejidades operativas y estratégicas de sistemas modernos de transporte público eléctrico, y contribuye a una planificación integral orientada a la sostenibilidad.

Como metodología de solución, se propone una matheurística diseñada para abordar de forma eficiente la complejidad computacional del modelo propuesto, el cual es de naturaleza no lineal y presenta variables enteras, múltiples restricciones. La estrategia se divide en tres etapas complementarias, las cuales combinan principios de relajación, reconstrucción y busqyeda local.

En la primera etapa, se plantea una relajación del modelo original, la cual consiste en eliminar un subconjunto crítico de restricciones que generan rigidez estructural. Esta relajación permite explorar una región más amplia del espacio factible y obtener soluciones iniciales con tiempos de cómputo significativamente menores. El objetivo aquí no es garantizar factibilidad completa, sino construir una solución guía que capture las decisiones más relevantes y genere buenas cotas duales para el modelo completo. La segunda etapa corresponde a una fase de reconstrucción factible. Utilizando la solución relajada como punto de partida, se reintroducen progresivamente las restricciones eliminadas y se obtiene una solución factible al modelo original. Finalmente, en la tercera etapa, se aplica una búsqueda local. En cada iteración, se resuelve el modelo original, apoyandase de una solución inicial dada. La matheurística concluye cuando se alcanza un criterio de parada definido.

II. Modelo matemático

Esta sección presenta el modelo matemático propuesto para la planificación de servicios en un sistema de transporte público con buses eléctricos. Para ello, se definen los siguientes conjuntos, parámetros y variables de decisión. Sea L el conjunto de líneas que operan en el sistema y V el conjunto de tipos de vehículos eléctricos disponibles. El conjunto de viajes planificados se denota por I, al que se agrega un viaje ficticio 0 para facilitar la formulación, conformando así el conjunto $I_0 = I \cup \{0\}$. Para cada tipo de vehículo $v \in V$, se define $I_v \subseteq I_0$ como el conjunto de viajes que pueden ser realizados por vehículos del tipo v. El conjunto S representa las estaciones de carga disponibles, y para cada viaje $i \in I$, se define $S_i \subseteq S$ como el subconjunto de estaciones que pueden ser visitadas durante ese viaje. Además, $S_i^-(s)$ indica las estaciones anteriores a $s \in S_i$ en el trayecto del viaje i; s_i^+ y s_i^- representan respectivamente la estación siguiente y anterior a s durante el viaje i, y s_i^{last} corresponde a la última estación en el recorrido del viaje i.

El parámetro α_i mide el impacto percibido por el usuario cuando se realiza una parada de carga durante el viaje i. La disponibilidad de vehículos de tipo v está dada por k_v. El tiempo requerido para recorrer el tramo entre s y s_i^+ durante el viaje i se denota por t_{is}, mientras que C_{is} representa el consumo energético correspondiente. Se incluye un buffer de seguridad β para evitar que el vehículo opere con niveles de carga peligrosamente bajos. Los parámetros λ_{is}, $\lambda_{i'i}$ y λ_{si} indican respectivamente el tiempo desde el final del viaje i hasta la estación s, desde el final de i' al inicio de i, y desde la estación s hasta el inicio del viaje i. La función $f_i(\cdot)$ representa la tasa de carga en el contexto del viaje i. Cada viaje $i \in I$ pertenece a una línea $l_i \in L$, y $A_{i'i}$ es un parámetro binario que toma valor 1 si hay interlineado entre los viajes i' e i (es decir, si $l_{i'} = l_i$ o si existe compatibilidad operacional entre ambas líneas).

Las variables de decisión del modelo son: $x_{i'i}$, que indica si el viaje i' precede directamente al viaje i en el itinerario de un vehículo; y_{is}, que vale 1 si el viaje i se recarga en la estación s; z_s, que indica si la estación s es habilitada como punto de carga; y $g_{i'is}$, que toma valor 1 si el viaje i' llega a la estación s antes que el viaje i, considerando ambos elementos en I_0. Las variables continuas tc_{is}, $dh_{i'i}$ y $cd_{i'i}$ representan respectivamente el tiempo de carga del viaje i en la estación s, el tiempo total entre el final de i' y el inicio de i, y el consumo energético en ese mismo intervalo. Por último, et_i denota el tiempo estimado de finalización del viaje i; u_{is}, el tiempo en que i alcanza la estación s; ca_{is}, la carga acumulada al llegar a s; e ic_i, la carga inicial del viaje i, determinada por el viaje que lo precede directamente. A continuación se presenta la formulación matemática

$$f_1 = \sum_{i \in I} BusCost\ x_{0i} + \sum_{s \in S_i} StationCost_s\ z_s$$

$$f_2 = \sum_{(i,i') \in I} ChCost_i\ cd_{ii'}$$

$$f_3 = \sum_{i \in I} x_{i0} \left(100 - \left(ca_{is_i^{last}} + f_i tc_{is_i^{last}} - C_{is_i^{last}}\right)\right)$$

$$min f_1 + f_2 + f_3$$

subject to:

$$\sum_{i' \in I_0 - \{i\}} x_{i'i} = 1 \qquad \forall\, i \in I$$

$$\sum_{i \in I_v} x_{0i} \leq k_v \qquad \forall\, v \in V$$

$$g_{ii's} + g_{i'is} \leq 1 \qquad \forall\, i,\ i' \in I,\ s \in S$$

$$u_{i's} + tc_{i's} \leq u_{is} + M\left(3 - y_{is} - y_{i's} - g_{i'is}\right) \qquad \forall\, i,\ i' \in I,\ s \in S$$

$$et_{i'} + dh_{i'i} \leq dt_i + M\left(1 - x_{i'i}\right) \qquad \forall\, i', i \in I$$

$$ca_{is} - C_{is} \geq \beta \qquad \forall\, s \in S,\ i \in I$$

$$x_{ii'} + x_{i'i} \leq 1 \qquad \forall\, i',\ i \in I$$

$$\sum_{i' \in I_0 - \{i\}} x_{i'i} - \sum_{i' \in I_0 - \{i\}} x_{ii'} = 0 \qquad \forall\, i \in I$$

$$x_{i'i} \leq A_{i'i} \qquad \forall\, i, i' \in I$$

$$\sum_{s \in S_i} tc_{is} \leq \alpha_i \qquad \forall\, i \in I$$

$$tc_{is} \leq y_{is} \qquad \forall\, i \in I\ s \in S$$

$$y_{is} \leq z_s \qquad \forall\, i \in I\ s \in S$$

$$\sum_{i \in I} x_{i0}\left(100 - \left(ca_{is_i^{last}} + f_i tc_{is_i^{last}} - C_{is_i^{last}}\right)\right) \geq \sum_{s \in S} z_s * PN$$

III. Metodología y Resultados

Como ya se mencionó anteriormente, la propuesta de solución se basa en una *matheurística* estructurada en tres etapas. La segunda de estas etapas tiene como objetivo construir una solución factible del modelo original, a partir de la información obtenida en la etapa de relajación formulada inicialmente. La idea central es aprovechar la estructura de la solución del modelo relajado, que suele tener tiempos de cómputo más razonables, para guiar la búsqueda hacia regiones prometedoras del espacio factible del problema original. Esto se logra mediante una fijación parcial de variables binarias, que mantiene parte de la solución relajada como una referencia estructural.

Sea $\bar{x}_{i'i}$ una solución obtenida del modelo relajado, donde $\bar{x}_{i'i} = 1$ indica que el viaje i' precede al viaje i en la secuencia resultante. A partir de esta solución, se define el conjunto de arcos activos como:

$$A = \{(i', i) \in I \times I : \bar{x}_{i'i} = 1\}.$$

Dado que fijar completamente todas las variables del conjunto A podría restringir excesivamente la factibilidad del modelo original, se introduce un parámetro de control $k \in [0, 1]$ que determina la proporción mínima de variables que deben mantenerse activas. En otras palabras, solo una fracción del conjunto A será obligatoriamente respetada en la segunda etapa. Esta estrategia se formaliza mediante la incorporación de la siguiente restricción al modelo:

$$\sum_{(i',i) \in A} x_{i'i} \geq k \cdot |A|. \tag{1}$$

Esta restricción asegura que al menos una fracción k de los arcos activos en la solución relajada también aparezcan en la solución factible del modelo original. Con esto, se logra preservar parcialmente la estructura del problema relajado, al tiempo que se mantiene suficiente flexibilidad para satisfacer todas las restricciones del modelo completo. Cabe destacar que para valores altos de k tienden a favorecer soluciones más cercanas a la relajación (lo que ayuda a tener soluciones en tiempos de computo mejores).

Para evaluar el desempeño de la matheurística propuesta, se diseñó un conjunto de experimentos computacionales con instancias generadas que representan redes de transporte público de distintos tamaños. Estas instancias fueron construidas de manera controlada, permitiendo variar tanto el número de viajes como la estructura de las líneas. Durante la experimentación se consideraron distintos valores del parámetro $k \in [0, 1]$, el cual regula la proporción de variables fijadas entre la solución relajada y la solución factible en la segunda etapa de la matheurística.

Además, se realizaron pruebas optimizando distintas funciones objetivo: f_1 minimización del tamaño de la flota más costos de infrestructura de carga, f_2 minimización costos de carga de viajes no comerciales, y f_3 minimización de la carga que se debe de realizar durante la noche. De esta forma, se evaluó la capacidad del enfoque propuesto para adaptarse a distintas prioridades operativas y estratégicas.

Los resultados obtenidos mediante la experimentación computacional respaldan la efectividad de la metodología propuesta, particularmente en términos de eficiencia computacional. Sin embargo, también se evidenció que la incorporación del tercer componente de la función objetivo, representado por f_3 (optimización de las cargas nocturnas), incrementa de manera sustancial la complejidad del problema. En algunos casos, la inclusión de f_3 provocó que el modelo no encontrara soluciones viables. Los resultados indican que el valor de k tiene un impacto directo tanto en la calidad de las soluciones obtenidas como en el tiempo de resolución. Como parte del trabajo en curso, se está llevando a cabo un proceso sistemático de calibración del parámetro k, con el objetivo de encontrar un equilibrio adecuado que permita obtener soluciones de alta calidad en tiempos aceptables.

References

[1] Olsen, N., & Kliewer, N. (2020). Scheduling Electric Buses in Public Transport: Modeling of the Charging Process and Analysis of Assumptions. *Logistics Research*, 13(4). DOI:10.23773/2020_4.

[2] A. Roggeveen, E. van der Hurk, and G. Desaulniers, "Electric vehicle scheduling with time windows and recharging activities," *Transportation Science*, vol. 55, no. 4, pp. 865–889, 2021.

[3] G. Hiermann, J. Puchinger, S. Ropke, and R. F. Hartl, "Electric fleet size and mix vehicle routing problems with time windows and recharging stations," *European Journal of Operational Research*, vol. 252, no. 3, pp. 995–1018, 2016.

[4] A. Pineda, C. Frías, and L. Van Mieghem, "Electric bus fast charging station location problem: A flow-refueling location model," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 64, pp. 209–222, 2018.

[5] Z. Wen, Q. Zhang, and X. Xiao, "Multi-objective optimization for electric vehicle scheduling considering charging infrastructure," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 1013–1025, 2018.

[6] F. Li, B. Pan, L. Zhang, and S. Tang, "A robust optimization model for electric bus charging station location with demand uncertainty," *Energy*, vol. 197, 117171, 2020.

[7] B. Yu, Z. Yang, and B. Y. Wei, "Optimizing charging station locations for electric bus systems under range and time constraints," *Transportation Research Part C*, vol. 89, pp. 1–17, 2018.

Session N°7 – Track N°1

OR Applications in Agriculture

Chair: Mac-Cawley, A. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
Place: G6-054
Time: 14:00 – 15:15

Modelo de Simulación Mensual para Obtener la Estructura y el Valor Económico Neto de un Rebaño de Vacas Lecheras, Aplicación a Partos Gemelares

Time: 14:00 – 14:15
Authors:

- Palma, O. *(Universidad Andrés Bello)*
- Plà-Aragonés, L. *(Universidad de Lleida)*
- Mac-Cawley, A. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Albornoz, V. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*

A System Dynamics Approach to Evaluating Sludge Management Strategies in Vinasse Treatment: Cost-Benefit Analysis and Scenario Assessment

Time: 14:20 – 14:35
Authors:

- Olivares, A. *(Universidad Católica del Norte)*
- Leger, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Poblete, R. *(Universidad Católica del Norte)*

Un Algoritmo de Aprendizaje a Través de Árboles de Dependencia para el Problema de Delineación de Zonas de Manejo Sitio-Específicas

Time: 14:40 – 14:55
Authors:

- Vicencio-Medina, S. *(Universidad Andrés Bello)*
- Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*
- Ríos-Solís, Y. *(Tecnologico de Monterrey)*
- Cid-Garcia, N. *(Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial)*

Predicting Equipment Degradation Using Sensor Information in Wine Bottling Lines

Time: 15:00 – 15:15
Authors:

- Stuck, T. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Askenasy, R. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Carrasco-Schmidt, R. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Castro, M. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Cho, A. *(Universidad Mayor)*
- Luna, R. *(Viña Concha y Toro)*
- Mac-Cawley, A. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Ruz, G. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*

Modelo de simulación mensual para obtener la estructura y el valor económico neto de un rebaño de vacas lecheras, aplicación a partos gemelares

Osvaldo Palma
Universidad de Lleida. Lleida, España
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
osvaldo.palma@unab.cl

Lluis M. Plà-Aragonés
Universidad de Lleida.
Lleida, España
lluismiquel.pla@udl.cat

Alejandro Mac Cawley
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
amac@uc.cl

Víctor Albornoz
Universidad Técnica Federico Santa María
Santiago, Chile
victor.albornoz@usm.cl

***Abstract*—** En este estudio, se desarrolla un modelo de simulación estocástica para un rebaño de vacas lecheras. Las variables de estado consideradas fueron el mes de lactancia, el estado de gestación y la paridad. Se propuso un modelo de simulación de eventos discretos para incluir abortos, efectos de abortos en la producción de leche, eventos de embarazo, mortalidad y sacrificio voluntario, con probabilidades dependientes del mes de lactancia y el estado de parto. El modelo se validó comparando los resultados simulados con los resultados analíticos de modelos de cadena de Markov equivalentes, demostrando que la simulación puede aproximarse a la estructura del rebaño y al valor económico neto del rebaño con diferencias despreciables. Se introdujo una cuarta dimensión para considerar los efectos de los partos gemelos, mostrando que el modelo de simulación adaptado puede representar mejores complejidades adicionales que los modelos analíticos. Nuestro modelo propuesto es una herramienta poderosa para la toma de decisiones en el manejo del rebaño lechero; Por ejemplo, los resultados indicaron que el modelo con partos gemelos tuvo un beneficio neto anual por vaca de $113,96, mientras que el modelo sin partos gemelos alcanzó los $263,17, destacando una pérdida de $149,21 por partos gemelos, lo que se alinea con los valores empíricos reportados en la literatura.

Keywords—Lácteos, vaca, reemplazo, simulación, cadena de Markov, parto doble.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

A System Dynamics Approach to Evaluating Sludge Management Strategies in Vinasse Treatment: Cost-Benefit Analysis and Scenario Assessment

Agustin Olivares
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
0009-0002-6428-6805

Paul Leger
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
0000-0003-0969-5139

Rodrigo Poblete
Escuela de Prevención de Riesgos y Medioambiente
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
0000-0002-8313-1203

***Abstract*—In the Chilean local alcohol industry (pisco industry), for one liter of alcohol produced 10-15 liters of vinasse as the main wastewater of the process. To comply with industrial waste regulations, vinasse must be stored, which enables evaporation, leaving behind a residual sludge. However, treating vinasse remains an environmental and industrial challenge, having a high nutrient concentration and acidity that can degrade soil quality and harm surrounding vegetation. While previous studies have modeled sludge generation and transport in urban water systems, research on industrial wastewater, such as the alcohol industry, remains limited, affecting the search for opportunities to improve the treatment process.. This paper proposes a *System Dynamics Model* (SDM) to assess the costs associated with three management strategies: natural drying of vinasse, relocation to an alternative site, and implementation of a coagulation-flocculation treatment to accelerate sludge production. This paper makes two contributions. First, we describe a pioneer SDM applicable to sludge management, which includes variables such as sludge transport, coagulant quantity, and ambient temperature to make hypothetical scenarios that affect the treatment processes of vinasse. Second, we present the expected results of the associated costs of the scenarios proposed in the model, helping decision-makers to manage vinasse. The model is calibrated with historical data provided by a company in the North of Chile, helping to improve the decision-making for vinasse treatment.**

***Index Terms*—System dynamics model, Vinasse, Sustainability.**

I. Introduction

Wastewater is a problem affecting the global population, having a water supply that is often wasted due to a lack of proper use or treatment. The main problems caused by wastewater are eutrophication and toxicity in the environment, which can lead to the death of species that inhabit those ecosystems [4].

Vinasse is a wastewater of the alcohol industry, generated during the distillation of ethanol from wine or other biomass feedstocks, with a high organic load, acidic pH, and significant concentrations of nutrients such as potassium, nitrogen, and phosphorus, as well as organic matter [2]. The large production volumes, with approximately 10–15 liters of vinasse per liter of ethanol as the main wastewater source from the production of alcohol [1].

Wastewater is now widely perceived as a valuable resource, having treatment to recover water by removing contaminants and containing reusable components such as minerals or nutrients. [11]. The potential of wastewater to produce products from waste needs to be evaluated through wastewater treatment processes and facilities.

For the management of wastewater, optimization, machine learning, and simulation methods are used to model their process. Optimization models have been applied to improve specific steps in the treatment train and enhance the overall operation of wastewater treatment plants [3], [12]. Machine learning is used to integrate production and sanitation of wastewater to assess the availability to develop and optimize the location of Wastewater Treatment Plants [7], [9]. Similarly, Simulation models have been used to analyze wastewater treatment processes and sludge generation dynamics, and for wastewater discharges in rivers to test mitigation strategies for pollution [6], [10]. Despite the advancements in modeling wastewater processes, a significant gap persists in addressing the behaviour of industrial wastewater treatment. This gap difficult to identify improvements in treatment methods for industrial applications, with challenges to find effective treatment approaches, estimating accurate costs, and developing efficient disposal methods for industrial-scale operations.

II. Materials and methods

A simulation model is a methodology used to represent real-world systems in a virtual environment, enabling the evaluation of hypothetical scenarios and their effects on processes. *System Dynamics Modeling* (SDM) is a simulation approach that studies the relationships between variables and their mutual influences, commonly used to model the management of water supply systems [6], [10].

SDM is particularly useful for identifying relationships of variables within systems, which starts with the creation of a quantitative model using a *Stock-Flow Diagram* (SFD). SFD enables the evaluation of relationships that affect the variables. SFD has been widely applied in wastewater management research, assessing the potential of artificial intelligence in

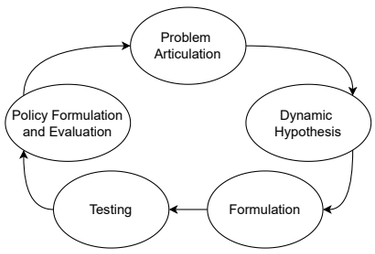


Fig. 1. Process modeling of SDM

TABLE I
MODEL TESTING SCENARIOS

Nº	Description	Parameters	Expected Result
1	Coagulant addition	Dosage amount Reduced vinasse usage	Increased sludge production
2	Sludge transport policy	Truck capacity/frequency Cost analysis	More efficient removal
3	Plant capacity expansion	Processing capacity Operational cost analysis	Higher vinasse handling

industrial settings, and analyzing water resource utilization patterns for different rice genotypes [5], [13]. These studies demonstrate the versatility of SFD in addressing complex water-related challenges.

III. METHODOLOGY

We follow the guidelines for the modeling process of SDM mentioned in [8]. Figure 1 shows where the process starts with the *Problem Articulation*, followed by *Dynamic Hypothesis Formulation*, *Simulation Model Formulation*, *Testing*, *Policy design and evaluation*, and *Simulation Result Analysis*, as an iterative process to make improvements in the model.

The SFD presents stock variables, including vinasse accumulation, sludge accumulation, and marginal cost. SFD incorporates flows, such as vinasse rates, evaporation rates, sludge production rates, and the cost threshold for the model.

In Figure 2, the management of wastewater of the alcohol industry is modeled using an SFD. Parameters are denoted with an initial capital letter (*e.g.* TotalCapacity), dynamic variables begin with a lowercase letter (*e.g.* sludgeRate), stock variables are represented as boxes (*e.g.* AccumulatedSlduge), and thick arrows indicate flows (*e.g.* vinasseRate).

The SFD is developed for quantitative analysis of the SDM by AnyLogic (8 PLE 8.9.5). The formulas used in the model rely on specific parameters, including production averages and probabilities that influence vinasse evaporation and sludge production.

In the baseline scenario, reflect the current state of the process of the vinasse treatment plant. The model begins with an empty system. The vinasse will enter the model based on the total production capacity of the plant. Upon arrival, the vinasse will be stored in a designated holding area within the plant. Simultaneously, the sludge will be generated and accumulate in the same storage pool. The vinasse contains suspended solids, which contribute to the overall composition of the stored material. This setup allows for the continuous accumulation of both vinasse and sludge.

Future hypothetical scenarios will systematically evaluate how key operational variables influence system performance. Table I shows the scenarios to be analyzed, such as the addition of coagulants to optimize sludge generation, adjusting sludge removal efficiency by pickup frequency, and the expansion of the vinasse processing capacity plant.

The model will be tested in the vinasse treatment plan located in the Coquimbo Region of the North of Chile, for the management of byproducts from alcohol production.

IV. EXPECTED RESULTS

Figure 3 illustrates the initial behavior of the model, showing the values of the amount of accumulated vinasse, the amount of accumulated sludge, and the costs associated with the operation of the vinasse treatment plant. To prevent exceeding the capacity limit of 18,000 m^3 of vinasse of the plant, adjustments are made to the vinasse arrival rate. The Figure shows the sludge generation seasonality, with 3,000 kg of sludge being extracted from the plant every 30 days. The marginal cost shows an increasing behaviour over time, maintaining a constant value until the start of sludge disposal, and subsequently increasing the transport cost of the system.

The expected results of the three proposed scenarios (coagulant addition, sludge transport policy, and plant capacity expansion) will be analyzed in comparison with the baseline model results, as detailed in the following points.

A. Coagulant addition

The first scenario evaluates the effect of coagulant addition on sludge generation optimization. The model predicts a reduction in vinasse volume due to accelerated sludge production. However, the operational costs of coagulants may offset the savings from reduced vinasse storage requirements. Additionally, sludge extraction frequency may require adjustment to account for higher sludge yields. The results will determine the assess the feasibility of implementing a new vinasse treatment method.

B. Sludge transport policy

The next scenario examines the effects of increasing truck capacity or pickup frequency for sludge removal. This adjustment is expected to reduce sludge accumulation in the plant, thereby freeing up storage space for incoming vinasse. The model will demonstrate a more balanced system with lower peak accumulation levels. However, higher transportation costs will increase operational expenses, necessitating a cost-benefit analysis to determine the optimal removal rate. The results will support the evaluation of alternative sludge management policies to optimize storage capacity.

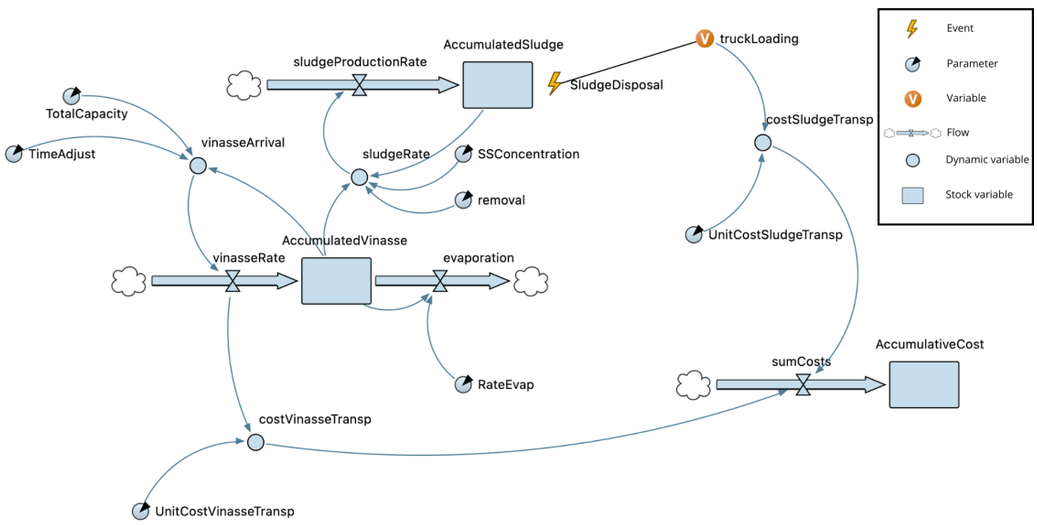


Fig. 2. Stock-Flow diagram of the Vinasse plant treatment

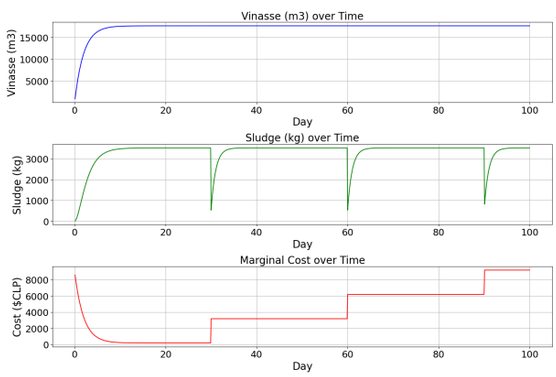


Fig. 3. Results of Vinasse accumulation, Sludge accumulation, and marginal cost

C. Plant capacity expansion

Expanding the vinasse processing capacity of the plant will be evaluated to assess its effect on system performance. The model will demonstrate a delayed saturation point, allowing for greater vinasse storage without immediate overflow risks. While this scenario improves operational flexibility. The results will highlight the trade-off between higher upfront costs and long-term operational advantages. The results will determine whether the capacity expansion is a cost-effective solution for improving plant performance.

Summary. The model will analyze the combined effects of using coagulants alongside increased sludge removal efficiency, changing the transport policy, and increasing the plant capacity. The results will provide insights into the most cost-effective strategies for managing vinasse and sludge accumulation for practical solutions to the specific conditions in the vinasse treatment plant.

REFERENCES

[1] Christofoletti, C.A., Escher, J.P., Correia, J.E., Marinho, J.F.U., Fontanetti, C.S.: Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. Waste Management **33**(12), 2752–2761 (9 2013)

[2] Fuess, L.T., Garcia, M.L.: Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of fertigation. Journal of Environmental Management **145**, 210–229 (7 2014)

[3] Han, H.G., Zhang, Y., Sun, H.Y., Liu, Z., Qiao, J.: Data-Knowledge-Driven Multiobjective Adaptive Optimal Control for Wastewater Treatment Processes Under Multiple Operating Conditions. IEEE Transactions on Cybernetics pp. 1–14 (1 2025)

[4] Kiely, G.: Environmental Engineering. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics (1 1997)

[5] Motahari, M., Sotoodehnia, A., Nazari, B., Yazdani, M.: Development of a water resources utilization model and optimization of the patterns of rice genotypes with system dynamics approach. Applied Water Science **14**(11) (10 2024)

[6] Pradana, H.A., Novita, E., Purnomo, B.H.: Simulation for water quality management using system dynamics modeling in the Bedadung Watershed, East Java, Indonesia. Journal of Degraded and Mining Lands Management **9**(2), 3217–3327 (12 2021)

[7] Sakti, A.D., Mahdani, J.N., Santoso, C., Ihsan, K.T.N., Nastiti, A., Shabrina, Z., Safira, M., Rohmat, F., Yulianto, F., Virtriana, R.: Optimizing city-level centralized wastewater management system using machine learning and spatial network analysis. Environmental Technology & Innovation **32**, 103360 (9 2023)

[8] Sterman, J.D.: Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World (1 2000)

[9] Thangarasu, T., Aldehim, G., Alruwais, N., Kandasamy, A.: Wastewater treatment plant site selection using advanced decision tree machine learning and remote sensing techniques. Environmental Science and Pollution Research (12 2024)

[10] Urban, R.C., Nakada, L.Y.K., De Lima Isaac, R.: A system dynamics approach for large-scale water treatment plant sludge management: A case study in Brazil. Journal of Cleaner Production **419**, 138105 (7 2023)

[11] Villarín, M.C., Merel, S.: Paradigm shifts and current challenges in wastewater management. Journal of Hazardous Materials **390**, 122139 (1 2020)

[12] Wang, K.J., Wang, P.S., Nguyen, H.P.: A data-driven optimization model for coagulant dosage decision in industrial wastewater treatment. Computers & Chemical Engineering **152**, 107383 (6 2021)

[13] Yu, J., Li, G.: Evaluating Artificial Intelligence-Based Industrial Wastewater Anaerobic Ammonium Oxidation Treatment Optimization and Its Environmental, Economic, and Social Benefits Using a Life Cycle Assessment–System Dynamics Model. Processes **13**(1), 59 (12 2024)

Un algoritmo de aprendizaje a través de árboles de dependencia para el problema de delineación de zonas de manejo sitio-específicas

1st Salvador J. Vicencio-Medina
Transportation and Logistics Center
Universidad Andres Bello
Concepción, Chile
chavachuii@gmail.com

2nd Armin Lüer-Villagra
Department of Engineering Sciences
Universidad Andres Bello
Concepción, Chile
armin.luer@unab.cl

3th Yasmin A. Rios-Solis
School of Engineering and Sciences
Tecnologico de Monterrey
Monterrey, México
yasmin.riossolis@tec.mx

4rd Nestor M. Cid-Garcia
National Geointelligence Laboratory
SECIHTI-Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial
Aguascalientes, México
nxtr.cd@gmail.com

***Abstract*—La agricultura de precisión brinda soluciones científicas para apoyar decisiones durante el ciclo agrícola. En su fase inicial, es esencial delimitar zonas de manejo específicas del sitio para optimizar insumos y rendimiento. Esta delimitación, basada en una propiedad del suelo (química, física o biológica), busca reducir el número de zonas manteniendo homogeneidad. Este trabajo introduce un enfoque novedoso, no reportado en la literatura, que utiliza árboles de dependencia para modelar interacciones entre variables. Además de minimizar zonas, se incorpora la reducción de varianzas dentro de cada una. El enfoque propuesto fue evaluado con dos funciones objetivo: una para minimizar zonas y otra que también reduce la suma de varianzas internas. Los resultados muestran mejoras en el tiempo y la calidad de las soluciones en el 100% de las instancias pequeñas y medianas.**

***Index Terms*—Árboles de Dependencia, EDAs, Zona de manejo Sitio-Específico, Metaheurística**

I. Introduction

La agricultura es clave para el desarrollo económico de países emergentes como México, que enfrentan retos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de sus sistemas agrícolas [1]. Recientemente, la adopción de tecnologías digitales, especialmente con el crecimiento del comercio electrónico, ha impactado de forma significativa el sector agrícola, generando nuevos desafíos [2]. La actual era de inteligencia digital está revolucionando la agricultura al incorporar tecnologías avanzadas que abordan problemas persistentes en la producción, especialmente los ligados a la variabilidad del suelo. Esto permite a los productores ajustar el uso de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas con base en datos en tiempo real sobre características del suelo, como humedad, nutrientes y pH.

Las Zonas de Manejo Sitio-Específicas (ZMSE) son áreas dentro de un campo que presentan características relativamente homogéneas que influyen en el rendimiento del cultivo. Su propósito es optimizar el uso de insumos, ajustándolos a las condiciones específicas de cada zona [3]. Para ser efectiva, una ZMSE debe ser fácil de delinear, precisa y económicamente viable.

Una vez definidas las ZMSE, el siguiente paso en la planificación consiste en seleccionar el cultivo a sembrar, tomando en cuenta los insumos requeridos por cada zona. Por ello, el rendimiento y los beneficios obtenidos al final del ciclo productivo dependen directamente de la correcta delimitación de las ZMSE [4].

En cuanto a las zonas de manejo sitio-específicas, la literatura se ha centrado en las ZMSE rectangulares, ya que son prácticas para la maquinaria agrícola tradicional [5], [6]. Sin embargo, recientemente se han estudiado zonas de forma ortogonal (formas tipo Tetris) [7]–[9].

II. Problem Description

Sea el conjunto S las muestras de suelo en el campo y el conjunto E las aristas de la cuadrícula que delimitan cada muestra. Considerando el conjunto Z como una partición de S donde $\emptyset \notin Z$, $\bigcup_{k=1,\dots,|Z|} z_k = S$, $z \cap z' = \emptyset$ para todos los pares de zonas $z \neq z' \in Z$.

Tomando los conjuntos como datos de enrada S y E, el objetivo del problema consiste en minimizar el número de zonas de manejo sitio-específicas, donde cada zona debe satisfacer un nivel de homogeneidad especificado por el agricultor. Formalmente, el problema se define como:

Identify applicable funding agency here. If none, delete this.

$$\min |Z| \tag{1}$$

subject to

$$1 - \left(\frac{\sum_{k=1}^{|Z|} (|z_k| - 1)\, \sigma^2 (z_k)}{\sigma^2 (S)\, (|S| - |Z|)} \right) \geq \alpha. \tag{2}$$

El objetivo (1) es minimizar el número de zonas de manejo sitio-específicas. La restricción 2 representa la varianza relativa (VR), que mide el nivel de homogeneidad $\alpha \in [0, 1]$. El numerador representa la varianza dentro de cada zona de manejo. $|z_k|$ representa el número de muestras de suelo en la zona de manejo k, el término $\sigma^2(z_k)$ es la varianza de la muestra en la zona de manejo k, para cada $k = 1, \cdots, |Z|$. Los términos en el denominador consisten en $\sigma^2(S)$, que representan la varianza total en todo el campo. $|S|$ y $|Z|$ representan el total de muestras de suelo y el número total de zonas de manejo en todo el campo, respectivamente.

El objetivo representado por la ecuación (1) es el objetivo habitual presentado en la literatura para el problema de delimitación de zonas de manejo sitio-específicas [7]–[9]. Sin embargo, en este trabajo, no solo se propone minimizar el número de zonas de manejo sitio-específicas, sino también la varianza de cada zona. Esta consideración hace que las zonas de gestión específicas del sitio sean más homogéneas que simplemente minimizar su número. Para lograrlo, propusimos el siguiente problema:

$$\min |Z| \cdot \sum_{k=1}^{|Z|} \sigma^2 (z_k) \tag{3}$$

subject to Equation (2).

El objetivo (3) busca minimizar el número de zonas de gestión específicas del sitio, reduciendo al mismo tiempo la suma de las varianzas dentro de cada zona. Dado que el número de zonas de manejo sitio-específicas y la suma de las varianzas dentro de cada zona de manejo están estrechamente relacionados con el nuevo objetivo propuesto y la ecuación 2, se requiere un algoritmo que considere las dependencias para explorar eficientemente el espacio de soluciones.

III. Solution Methods

Los algoritmos genéticos basados en modelos probabilísticos, mejor conocidos como Algoritmos de Estimación de Distribución (EDA por sus siglas en inglés, *Estimation of Distribution Algorithms*), son metaheurísticas poblacionales que reemplazan los operadores de cruce y mutación del Algoritmo Genético estándar con estimación y muestreo [10]. Los EDA se clasifican según su modelo de probabilidad, considerando dependencias o ausencia de ellas. Se ha demostrado que los EDA generan soluciones de alta calidad con tiempos computacionales eficientes en diversos problemas de optimización combinatoria, incluyendo el problema de delineación de zonas de manejo sitio-específicas [7], [9].

Utilizamos el árbol de dependencias EDA, mejor conocido como *Dependency-Tree EDA* (dt-EDA). El modelo probabilístico construido para la población seleccionada en el dt-EDA forma un árbol de dependencias [11], [12]. Un modelo de árbol de dependencias consta de dos componentes: la estructura, que define las dependencias condicionales entre las variables y los parámetros, y los parámetros, que especifican las probabilidades marginales y condicionales incluidas en el modelo [13].

IV. Experimental Results

El dt-EDA propuesto se probó con las instancas clásicas de la literatura: [5], [7]–[9]. Estas instancias constan de cuatro instancias reales. Cada instancia real contiene información sobre una propiedad diferente del suelo, incluyendo materia orgánica (MO), potencial de hidrógeno (pH), fósforo (P) y suma de bases (SB). Este conjunto incluye 40 muestras de suelo, junto con dos muestras ficticias añadidas para completar una cuadrícula perfecta, para un total de 42 muestras (6×7).

Real instances results

La tabla I muestra los resultados experimentales para las instancias reales. La primera columna determina el nivel de homogeneidad (α). La columna 2 especifica el ID de la instancia, en este caso, la propiedad del suelo. Las columnas 3 a 10 presentan los resultados del UMDA presentando en la literatura, donde las columnas 3 a 6 son los resultados para minimizar las ZMSE y las columnas 7 a 10 para minimizar las ZMSE y la varianza total. Para cada versión de la función objetivo, la tabla presenta el total de zonas obtenidas ($|Z|$), la desviación (Dev), la varianza total obtenida en la delineación final (Var) y el tiempo en segundos necesario para alcanzar la solución (Time). Las columnas 11 a 18 son similares a las columnas anteriores, pero para el dt-EDA.

TABLE I
Experimental results. Real instances

α	ID	UMDA								dt-EDA							
		Min Zones				Min Zones and Var				Min Zones				Min Zones and Var			
		$\|Z\|$	Dev	Var	Time	$\|Z\|$	Dev	Var	Time	$\|Z\|$	Dev	Var	Time	$\|Z\|$	Dev	Var	Time
0.5	SB	3	0.00	1.57	13.06	3	0.00	1.34	20.97	2	0.14	1.67	2.07	3	0.00	1.34	2.03
	P	2	0.00	3.67	12.71	3	0.00	2.26	21.32	2	0.00	3.67	1.90	3	0.00	2.26	2.68
	OM	5	0.21	7.43	15.15	7	0.00	3.43	22.53	4	0.50	5.81	2.24	6	0.14	4.32	2.31
	pH	4	0.02	0.01	13.66	7	2.86	0.02	19.94	4	0.24	0.01	2.10	4	0.20	0.01	2.36
0.7	SB	5	0.20	1.20	14.21	5	0.00	1.20	19.66	5	0.00	1.47	2.03	5	0.20	1.20	2.09
	P	3	0.00	5.13	13.28	3	0.00	2.26	18.40	3	0.00	5.13	1.96	3	0.00	2.26	2.33
	OM	8	0.53	8.38	16.12	10	0.00	4.53	21.98	8	0.20	7.30	2.01	9	0.28	3.72	2.07
	pH	6	0.00	0.01	14.77	9	3.95	0.01	20.52	5	0.37	0.01	1.98	5	0.45	0.01	2.00
0.9	SB	14	0.20	0.88	16.64	13	2.12	1.16	23.24	13	0.48	1.16	2.05	13	1.23	1.08	2.05
	P	7	0.24	2.00	13.90	8	0.00	0.91	20.17	6	0.62	2.01	2.07	6	0.40	2.05	1.97
	OM	17	0.37	3.95	17.54	16	0.38	3.79	25.40	16	0.39	4.59	2.06	16	0.42	3.79	2.11
	pH	13	0.98	0.01	17.20	16	0.00	0.00	24.19	13	0.24	0.01	2.07	13	1.11	0.01	2.22

Para cada función objetivo, el dt-EDA produce resultados similares o mejores que el UMDA, mejorando así el número total de zonas (columna $|Z|$) y la desviación (columna Dev) dentro de las zonas. Además, el dt-EDA reduce el tiempo de ejecución (columna Time) para todo el conjunto de instancias. En cuanto a la varianza total (columna Var), en casi todos los casos, el dt-EDA es mejor que el UMDA. Para ambas funciones objetivo, el dt-EDA mejora los resultados, especialmente en cuanto al número de zonas.

V. Conclusions

Este trabajo presenta un enfoque novedoso para resolver el problema de las Zonas de Manejo Sitio-Específicas, cuyo objetivo es minimizar el número de zonas en un campo agrícola que satisfacen un umbral de homogeneidad. La novedad de este enfoque reside en el uso de árboles de dependencia para aprender las interacciones entre variables. El modelo aprendido se utiliza para muestrear nuevas soluciones bajo el esquema de un Algoritmo de Estimación de Distribución. Nuestro enfoque, denominado dt-EDA, se probó con las instancias presentes en la literatura. Utilizamos un conjunto de instancias reales considerando tres niveles de homogeneidad diferenes. Los resultados experimentales muestran que dt-EDA mejora el 100% de los resultados para instancias de tamaño pequeño y mediano, comparándolo contra el mejor enfoque de la literatura para generar zonas de manejo sitio-específicas.

Acknowledgment

Nestor M Cid-Garcia agradece el apoyo de la SECIHTI para la realización de este trabajo.

References

[1] C. E. Arroyo-Cruz, B. Prado, M. Kolb, L. N. Mora-Palomino, K. Todd-Brown, and M. Guevara, "Synthesis of a national soil dataset across productive land in mexico: The importance of making existing data accessible," *European Journal of Soil Science*, vol. 76, no. 3, p. e70116, 2025.

[2] D. S. Schwering, W. I. Sonntag, and S. Kühl, "Agricultural e-commerce: Attitude segmentation of farmers," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 197, p. 106942, 2022.

[3] S. Nawar, R. Corstanje, G. Halcro, D. Mulla, and A. M. Mouazen, "Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review," *Advances in agronomy*, vol. 143, pp. 175–245, 2017.

[4] V. M. Albornoz, N. M. Cid-García, R. Ortega, and Y. A. Ríos-Solís, *A Hierarchical Planning Scheme Based on Precision Agriculture*. New York, NY: Springer New York, 2015, pp. 129–162.

[5] N. M. Cid-Garcia, V. Albornoz, Y. A. Rios-Solis, and R. Ortega, "Rectangular shape management zone delineation using integer linear programming," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 93, pp. 1–9, 2013.

[6] N. M. Cid-Garcia and O. J. Ibarra-Rojas, "An integrated approach for the rectangular delineation of management zones and the crop planning problems," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 164, p. 104925, 2019.

[7] J. Velasco, S. Vicencio, J. Lozano, and N. M. Cid-Garcia, "Delineation of site-specific management zones using estimation of distribution algorithms," *International Transactions in Operational Research*, vol. 0, pp. 1–27, 2021.

[8] L. E. Urbán Rivero, J. Velasco, and J. Ramírez Rodríguez, "A simple greedy heuristic for site specific management zone problem," *Axioms*, vol. 11, no. 7, p. 318, 2022.

[9] S. J. Vicencio-Medina, Y. A. Rios-Solis, and N. M. Cid-Garcia, "A bio-inspired optimization algorithm with disjoint sets to delineate orthogonal site-specific management zones," *Precision Agriculture*, vol. 26, no. 1, p. 14, 2025.

[10] P. Larrañaga and J. A. Lozano, *Estimation of distribution algorithms: A new tool for evolutionary computation*. Springer Science & Business Media, 2001, vol. 2.

[11] C. Chow and C. Liu, "Approximating discrete probability distributions with dependence trees," *IEEE transactions on Information Theory*, vol. 14, no. 3, pp. 462–467, 1968.

[12] S. Baluja, S. Davies *et al.*, "Using optimal dependency-trees for combinatorial optimization: Learning the structure of the search space," Carnegie-Mellon University. Department of Computer Science, Tech. Rep., 1997.

[13] M. Pelikan, S. Tsutsui, and R. Kalapala, "Dependency trees, permutations, and quadratic assignment problem," in *Genetic And Evolutionary Computation Conference: Proceedings of the 9 th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, vol. 7, no. 11, 2007, pp. 629–629.

Predicting equipment degradation using sensor information in wine bottling lines.

1st Tomás Stuck
Department of Industrial and Systems Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
tomasstuck@uc.cl

2st Ricardo Askenasy
Department of Industrial and Systems Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
rjaskenasy@uc.cl

3nd Rodrigo Carарsco
Department of Industrial and Systems Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
rcarrass@uc.cl

4rd Margarita Castro
Department of Industrial and Systems Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
margarita.castro@uc.cl

5th Anthony Cho
Department of Industrial and Systems Engineering
Universidad Mayor
Santiago, Chile
anthony.cho@umayor.cl

6th Ricardo Luna
Centro de Investigación e Innovación (CII)
Viña Concha y Toro
Santiago, Chile
Centro de Investigación e Innovación (CII)
ricardo.luna@conchaytoro.cl

7th Alejandro Mac Cawley
Department of Industrial and Systems Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
amac@uc.cl

8th Gonzalo Ruz
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
gonzalo.ruz@uai.cl

***Abstract*—The PLASMA project, Platform for Systems Analytics and Advanced Maintenance, aims to refine and validate the models and predictive and prescriptive algorithms previously developed by the team and currently used by the ALMA Radio Telescope. It implements an intelligent cloud-based platform that supports the management and optimization of maintenance in production systems, with applications to a wide variety of industrial processes.**

We will present the initial results of the predictive failure algorithms that aim to predict the Remaining Useful Life (RUL) and projected probability distribution of equipment involved in bottling a large Chilean wine company.

Several sensors were deployed in the equipment along with existing ones, obtaining historical information related to temperature, vibration, noise, production rate, stops, among many other data collected. We tested several filters to reduce noise and correlated the data with failure events. Unfortunately, the recorded failure events were only three, which did not allow us to perform any type of accurate prediction, and we are currently in the process of predicting equipment degradation trends.

***Index Terms*—Predictive Maintenance, Sensors, RUL, Optimization**

This project is funded by ANID Grant FONDEF IT24I0031

Session N°7 – Track N°2

Last Mile Logistics

Chair: Goic, M. *(Universidad de Chile)*
Place: G6-055
Time: 14:00 – 15:15

Strategic Design of Collection and Delivery Point Networks for Urban Parcel Distribution

Time: 14:00 – 14:15
Authors:

- Klapp, M. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Rojas-Espinoza, B. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Larraín, H. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Real-world Exposure to Last-mile Delivery Externalities: A Novel Approach Using Vehicle and Human Trajectory Data

Time: 14:20 – 14:35
Authors:

- Basso, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Perotti, S. *(Politecnico di Milano)*
- Fuentes, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Pezoa, R. *(Universidad Diego Portales)*
- Covarrubia, J. *(Empresa Nacional de Telecomunicaciones)*

Tactical Workforce Sizing for In-house and Occasional Couriers

Time: 14:40 – 14:55
Authors:

- Rojas-Espinoza, B. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Klapp, M. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Larraín, H. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Pricing of Last-Mile Vehicle Routes in the Shared Economy

Time: 15:00 – 15:15
Authors:

- Goic, M. *(Universidad de Chile)*
- Loaiza, D. *(Universidad de Chile)*
- Sauré, D. *(Universidad de Chile)*

Strategic design of collection and delivery point networks for urban parcel distribution

Extended abstract for the 15th Chilean Conference on Operations Research.

Mathias Klapp
Pontificia Universidad Católica
Santiago, Chile
maklapp@uc.cl

Benjamin Rojas
Pontificia Universidad Católica
Santiago, Chile
bgrojas@uc.cl

Homero Larrain
Pontificia Universidad Católica
Santiago, Chile
homero@uc.cl

***Index Terms*—Last-mile distribution, collection and delivery points, home delivery, continuous approximation.**

I. Motivation and literature review

Logistics scientists and practitioners have proposed various innovations to reduce last-mile logistics costs and increase customer service levels. One such innovation is the introduction of collection and delivery points (CDPs) where customers can opt to pick up their online purchases as an alternative to home delivery; these CDPs can be either self-attended, as in parcel lockers, or assisted by store personnel. The use of CDPs allows logistics planners to consolidate multiple customer request deliveries on a single vehicle stop, reducing last-mile distribution costs. However, for customers to adopt CDPs, they must be willing to travel to a nearby facility to pick up their parcels. This choice depends on personal preferences, the proximity of CDPs, and economic incentives. Therefore, strategic CDP network design decisions should balance the trade-off between infrastructure expenses, distribution costs, and incentives to customers.

Existing scientific literature on the use of CDPs for last-mile distribution systems can be categorized as operational, strategic, or combined depending on the scope of the decisions involved. At the operational level, the focus is placed on the efficient use of an installed CDP network to minimize last-mile routing costs. Particularly, these studies relate to Vehicle Routing Problem models with delivery options (see [1] and [2]), where each customer offers multiple delivery locations, *e.g.*, home delivery and the available CDPs. Additional related operational studies are [3]–[6]. At the strategic level, most existing works focus on CDP network design and location decisions to balance infrastructure costs and customer coverage (*e.g.*, [7]–[12]) We are only aware of strategic studies where the CDP delivery is the only service option available, disregarding the home delivery service option. Combined studies (*e.g.*, [13], [14]) integrate operational and strategic decisions, acknowledging the interlocked decisions between last mile distribution and CDP network sizing and location decisions. Unfortunately, the role of customer incentives remains underexplored, with only [15] and [16] addressing them from an operational perspective.

Benjamin Rojas' work is supported by the Chilean National Agency for Research and Development (ANID) under PhD grant 21230934.

In this study, we propose a novel strategic model that integrates CDP network design with customer incentives to minimize costs. Using a continuous approximation approach and discrete choice models, we estimate operational logistics costs and determine the optimal number of CDPs and economic incentives for customers choosing to pick up their requests at CDPs. In our experiments, we show that CDP networks without incentives to customers can reduce total costs by 16.9% while incorporating incentives increases potential savings to 28.1%. These findings highlight the value of CDPs to reduce both logistics costs and transportation-related externalities, such as congestion and emissions.

II. Methodology

Analyzing a CDP network design problem integrated with vehicle routing decisions and customer service choices is complex, especially when there exists uncertainty related to the number and location of customers and service preferences. To manage decision making in such a setting, we present a continuous approximation model that approximates the expected operational total cost $c(x, y)$ in a simple function depending on two structural decisions: the size of the CDP network (x), and the incentive level offered to customers who opt to pick up their deliveries at a CDP (y). This formula adds expected infrastructure, distribution, and customer incentive costs. We then leverage our model to optimize these structural decisions x and y. Our analysis is based on aggregated parameters, including the expected demand volume, service area size, average customer CDP choice behavior, and key operational parameters, such as vehicle speed. Figure 1 outlines our methodology.

III. Results

We use simulated data to calibrate our approximate cost model and then conduct a comprehensive analysis by varying key models to reflect a broad spectrum of potential last-mile distribution settings. We compare and test four benchmark strategies: (i) a pure home-delivery baseline strategy without CDPs, (ii) a strategy that uses CDPs but offers no customer incentives, (iii) an optimal strategy that combines CDPs with

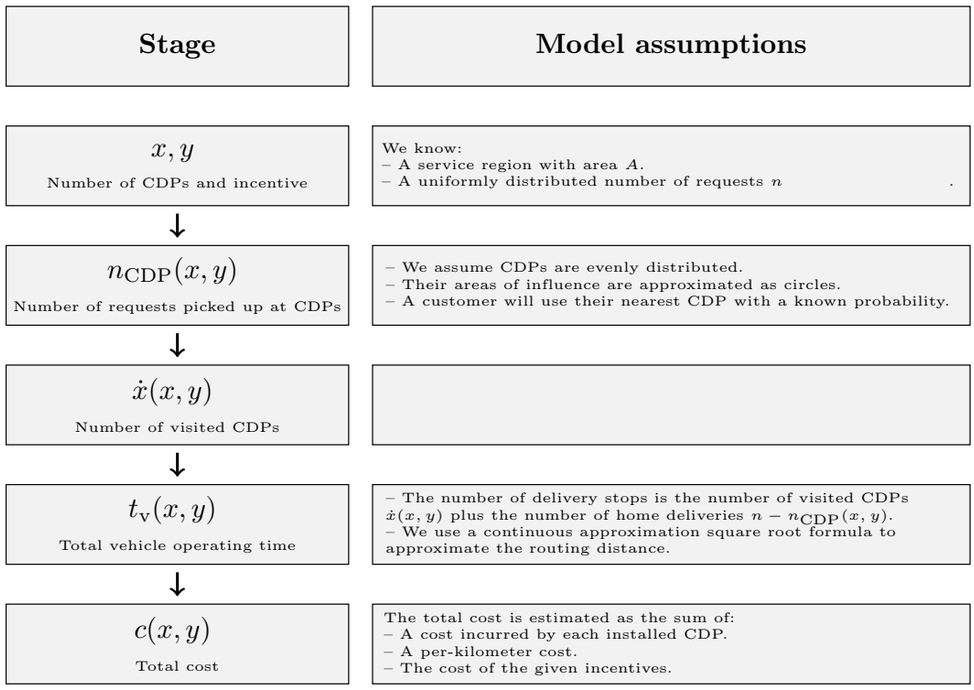


Fig. 1. Overview of our methodology.

TABLE I
BASE CASE SCENARIO RESULTS.

		Benchmark		
	Cost without CDPs	**Minimum cost without incentive**	**Minimum cost**	**Minimum cost with free CDPs**
Cost	564.3	468.6	405.9	222.7
% savings	-	16.9%	28.1%	60.5%
Infrastructure cost	0	133.0	97.4	0
Distribution cost	564.3	335.6	199.0	203.9
Incentive cost	0	0	109.6	18.7
x	0	4.43	3.25	17.81
y	0	0	0.69	0.11

cuatomer incentives, and (iv) a lower bound that assumes CDPs are available to be installed at no cost. Table I summarizes our numerical results for a base case scenario with a demand density of 7 customer requests per square kilometer. Without the use of CDPs, the logistics operation incurs only distribution costs ($563.4 per day). If we install a cost-efficient CDP network, then we can cut these expected costs to $468.6 per day by consolidating the delivery of requests to customers who choose CDPs, but at a CDP infrastructure cost. When incentives to customers choosing CDPs are introduced and jointly optimized with the CDP network sizing decision, then the expected cost further decreases to $405.9. Compared to the previous solution, distribution and infrastructure costs are lower, as customers are more willing to pick up their orders at a CDP. Finally, if CDP infrastructure is available at no cost, then the system's expected minimum cost is $222.7 per day.

Our analysis yields several key insights:

(i) Optimal CDP network sizing leads to substantial reductions in operational cost, particularly in areas with high demand density.
(ii) Customer incentives are especially effective in low-density areas, as they motivate customers to travel farther, thereby reducing the need for additional CDP installations.
(iii) Network design outcomes differ notably when accounting for the stochastic nature of customer service choices.
(iv) Expected system costs increase sublinearly as a function of infrastructure expenses.
(v) When CDP infrastructure is assumed to be free, last-mile distribution costs can be reduced by more than 60%,

suggesting that public investment in CDP networks could be a promising strategy to mitigate transportation-related externalities.

REFERENCES

[1] D. Dumez, F. Lehuédé, and O. Péton, "A large neighborhood search approach to the vehicle routing problem with delivery options," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 144, pp. 103–132, 2 2021.

[2] C. Tilk, K. Olkis, and S. Irnich, "The last-mile vehicle routing problem with delivery options," *OR Spectrum*, vol. 43, pp. 877–904, 12 2021.

[3] X. Zang, L. Jiang, C. Liang, and X. Fang, "Coordinated home and locker deliveries: An exact approach for the urban delivery problem with conflicting time windows," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 177, p. 103228, 9 2023.

[4] S. Mancini and M. Gansterer, "Vehicle routing with private and shared delivery locations," *Computers and Operations Research*, vol. 133, p. 105361, 9 2021.

[5] A. G. dos Santos, A. Viana, and J. P. Pedroso, "2-echelon lastmile delivery with lockers and occasional couriers," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 162, p. 102714, 6 2022.

[6] M. Dell'Amico, R. Montemanni, and S. Novellani, "Pickup and delivery with lockers," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 148, p. 104022, 3 2023.

[7] Y. Deutsch and B. Golany, "A parcel locker network as a solution to the logistics last mile problem," *International Journal of Production Research*, vol. 56, pp. 251–261, 1 2018.

[8] S. Mancini, M. Gansterer, and C. Triki, "Locker box location planning under uncertainty in demand and capacity availability," *Omega*, vol. 120, p. 102910, 10 2023.

[9] T. Raviv, "The service points' location and capacity problem," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 176, p. 103216, 8 2023.

[10] Y. H. Lin, Y. Wang, D. He, and L. H. Lee, "Last-mile delivery: Optimal locker location under multinomial logit choice model," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 142, p. 102059, 10 2020.

[11] Y. Lin, Y. Wang, L. H. Lee, and E. P. Chew, "Profit-maximizing parcel locker location problem under threshold luce model," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 157, p. 102541, 1 2022.

[12] X. Xu, Y. Shen, W. A. Chen, Y. Gong, and H. Wang, "Data-driven decision and analytics of collection and delivery point location problems for online retailers," *Omega*, vol. 100, p. 102280, 4 2021.

[13] M. Janjevic, M. Winkenbach, and D. Merchán, "Integrating collection-and-delivery points in the strategic design of urban last-mile e-commerce distribution networks," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 131, pp. 37–67, 11 2019.

[14] D. L. Enthoven, B. Jargalsaikhan, K. J. Roodbergen, M. A. uit het Broek, and A. H. Schrotenboer, "The two-echelon vehicle routing problem with covering options: City logistics with cargo bikes and parcel lockers," *Computers and Operations Research*, vol. 118, p. 104919, 6 2020.

[15] A. Galiullina, N. Mutlu, J. Kinable, and T. V. Woensel, "Demand steering in a last-mile delivery problem with home and pickup point delivery options," *Transportation Science*, vol. 58, pp. 454–473, 3 2024.

[16] F. Akkerman, P. Dieter, and M. Mes, "Learning dynamic selection and pricing of out-of-home deliveries," *Transportation Science*, vol. 0, no. 0, 11 2024.

Real-world exposure to last-mile delivery externalities: a novel approach using vehicle and human trajectory data

Franco Basso
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile

Sara Perotti
Politecnico di Milano
Milan, Italy

Francisco Fuentes
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile

Raúl Pezoa
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile

Julio Covarrubia
Empresa Nacional de Telecomunicaciones
Santiago, Chile

***Abstract*— Research on last-mile delivery services and their environmental externalities has traditionally focused on emissions at the source, with limited attention to how these effects are distributed across urban populations. However, negative externalities such as pollution and noise do not impact all residents equally, as exposure is shaped by spatial and temporal proximity to the source. This paper proposes a novel framework to measure the heterogeneous impact of last-mile delivery by integrating high-resolution GPS data from vehicles with dynamic demographic information derived from mobile phone traces. Using econometric models -including zero-inflated count and linear regression techniques- we quantify how delivery vehicle activity correlates with population density and sociodemographic characteristics throughout the day in Santiago, Chile. Our findings reveal substantial disparities in exposure across age, gender, and socioeconomic groups, underscoring the uneven burden of urban logistics on public health and environmental justice. This framework enables more targeted and equitable mitigation strategies for urban freight operations by identifying who is most affected and where. The results highlight the need for logistics planning that accounts not only for operational efficiency but also for its differentiated impact on urban communities.**

Keywords*— *pollution exposure, last-mile delivery, mobile phone data, group disparities

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Tactical workforce sizing for in-house and occasional couriers

Extended abstract for the 15th Chilean Conference on Operations Research.

Benjamin Rojas
Pontificia Universidad Católica
Santiago, Chile
bgrojas@uc.cl

Mathias Klapp
Pontificia Universidad Católica
Santiago, Chile
maklapp@uc.cl

Homero Larrain
Pontificia Universidad Católica
Santiago, Chile
homero@uc.cl

***Index Terms*—Last-mile distribution, occasional couriers, continuous approximation.**

I. Motivation and literature review

One of the key factors that makes last-mile delivery planning and operations particularly complex is the highly unpredictable nature of customer demand across different time scales and urban areas. To address this problem, both logistics scientists and practitioners have proposed to (at least partially) relying on an occasional couriers' workforce [1], [2], who can adapt to these demand fluctuations. An occasional courier is an individual who offers their own time and vehicle to deliver goods to end customers in exchange for monetary compensation, providing an extra layer of flexibility to the process of defining a workforce size. However, they also introduce extra complexities, since their availability and willingness to work are uncertain and not under the direct control of the logistics operators.

Most studies on occasional couriers in last-mile delivery focus on operational decisions such as routing, offering, and assigning orders, typically using vehicle routing problem variants [3]–[8]. Others consider couriers' choice behavior, designing order menus, and estimating selection probabilities [9]–[16]. At the tactical level, some works plan shifts for primary couriers under uncertainty, incorporating dynamic routing, repositioning, and pricing [2], [17], [18]. However, less attention has been given to supporting workforce sizing decisions that account for the inherent uncertainty of occasional courier availability in a tractable and anticipative manner.

Sizing a workforce for last-mile delivery operations at the tactical level is complex, especially when dealing with significant uncertainty in customer demand and occasional courier availability. In this work, we investigate how to determine the optimal workforce size when labor is sourced from two types of couriers: fixed, reliable in-house couriers and flexible, occasional couriers. To tackle this problem, we propose a continuous approximation model of the system, which allows us to estimate and optimize operational costs.

Benjamin Rojas' work is supported by the Chilean National Agency for Research and Development (ANID) under PhD grant 21230934.

II. Methodology

We study the tactical workforce sizing problem for a last-mile distribution operation that serves customers placing online orders. At the beginning of the planning horizon, the decision-maker must determine the number of fixed in-house couriers x to hire as part of the reliable workforce; each in-house courier is assigned work shifts of fixed duration t^{x} and earns an hourly wage of α^{x}. At the operational level, the number of daily next-day delivery orders N is revealed. Based on this information, the decision-maker determines the number of work shifts y with maximum duration t^{y} and hourly wage α^{y}, to offer to occasional couriers via an app-based platform. Subsequently, the number of occasional couriers who accept these shifts M is realized, and the delivery orders are dispatched through vehicle routes originating from a distribution center to individual customer locations. Each unserved order is penalized by a cost of π. The decision-maker incurs costs comprising in-house courier wages, payments for accepted shifts by occasional couriers, and penalties for unserved orders.

The core of our model relies on accurately estimating the number of orders that a given number of couriers z can serve during their work shifts of duration t^{z}, denoted by $\dot{N}(z, t^{\mathrm{z}})$. We estimate this quantity by applying an extended version of the Beardwood-Halton-Hammersley theorem [19]. Then, we model our problem as

$$\min\left\{\alpha^{\mathrm{x}} t^{\mathrm{x}} x + \mathbb{E}_N\left[\psi_2(x, N)\right] : x \geq 0\right\}, \quad \text{(1a)}$$

$$\psi_2(x, N) = \min\left\{\mathbb{E}_M\left[\psi_3(y, M)\right] : y \geq 0\right\}, \quad \text{(1b)}$$

$$\psi_3(y, M) = \alpha^{\mathrm{y}} t^{\mathrm{y}} R + \pi\left(N - \dot{N}(x, t^{\mathrm{x}}) - \dot{N}(R, t^{\mathrm{y}})\right)^+, \quad \text{(1c)}$$

where $R = \min\{y, M\}$ represents the realized number of available occasional couriers, and $(z)^+ = \max\{0, z\}$ denotes the positive part of z. Model 1 is a newsvendor-type problem that, under mild assumptions on the structure of $\dot{N}(z, t^{\mathrm{z}})$ and known distributions for the random variables N and M, admits closed-form solutions that require minimal computational effort.

III. Preliminary results

We calibrate and validate our approximated cost model through a simulation of detailed delivery operations, and then

use it to derive some managerial insights. Here, we compare two benchmarks considering the cases with (i) no occasional couriers, and (ii) occasional couriers executing vehicle routes for order delivery. Table I shows the results of solving Model 1 under these settings. As observed, when considering solely in-house couriers, the optimal decision is to hire approximately 3.77 of them, resulting in an expected cost of \$610.00 per service day. This cost is composed of \$565.74 in wages for in-house couriers and \$44.26 in penalty costs for unserved orders. When considering occasional couriers, the optimal decision is to hire 5.75 of them and 0.8 in-house couriers. This results in a total expected cost of \$473.38 *i.e.*, a 22.40% reduction compared to benchmark (i), mainly due to the decrease in courier wage costs. Nevertheless, as occasional couriers add variability to the system, we observe that penalty costs increase by 19.37% when moving from benchmark (i) to benchmark (ii).

TABLE I
PRELIMINAR RESULTS

	(i)	**(ii)**
Cost	610.00	473.38
% savings	-	22.40%
In-house courier cost	565.74	120.55
Occasional courier cost	0.00	300.00
Penalty cost	44.26	52.83
$x^\star$	3.77	0.80
$y^\star$	0.00	5.75

We expect our approximation model to help us derive practical managerial lessons regarding how to correctly size a workforce for performing the last-mile delivery segment. We are particularly interested in analyzing the tradeoffs existing in balancing couriers and penalty costs, especially when considering the presence of occasional couriers who naturally add variability to the system. In that sense, we are also working on a risk-averse version of Model 1, which accounts for the conditional value at risk instead of purely expected values of the cost function.

REFERENCES

[1] M. Savelsbergh and M. W. Ulmer, "Challenges and opportunities in crowdsourced delivery planning and operations—an update," *Annals of Operations Research*, vol. 343, pp. 639–661, 12 2024.

[2] M. W. Ulmer and M. Savelsbergh, "Workforce scheduling in the era of crowdsourced delivery," *Transportation Science*, vol. 54, pp. 1113–1133, 7 2020.

[3] C. Archetti, M. Savelsbergh, and M. G. Speranza, "The vehicle routing problem with occasional drivers," *European Journal of Operational Research*, vol. 254, pp. 472–480, 10 2016.

[4] G. Macrina, L. D. P. Pugliese, F. Guerriero, and D. Laganà, "The vehicle routing problem with occasional drivers and time windows," in *Optimization and Decision Science: Methodologies and Applications*, A. Sforza and C. Sterle, Eds., 2017, pp. 577–587.

[5] S. Mancini and M. Gansterer, "Bundle generation for last-mile delivery with occasional drivers," *Omega*, vol. 108, p. 102582, 4 2022.

[6] ——, "Bundle generation for the vehicle routing problem with occasional drivers and time windows," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 1 2024.

[7] A. M. Arslan, N. Agatz, L. Kroon, and R. Zuidwijk, "Crowdsourced delivery—a dynamic pickup and delivery problem with ad hoc drivers," *Transportation Science*, vol. 53, pp. 222–235, 2 2019.

[8] I. Dayarian and M. Savelsbergh, "Crowdshipping and same-day delivery: Employing in-store customers to deliver online orders," *Production and Operations Management*, vol. 29, pp. 2153–2174, 9 2020.

[9] A. B. Çınar, W. Dullaert, M. Leitner, R. Paradiso, and S. Waldherr, "The role of individual compensation and acceptance decisions in crowdsourced delivery," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 169, p. 104834, 12 2024.

[10] G. Macrina, C. Archetti, and F. Guerriero, "Bundles generation and pricing in crowdshipping," *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 13, p. 100142, 2024.

[11] K. Gdowska, A. Viana, and J. P. Pedroso, "Stochastic last-mile delivery with crowdshipping," *Transportation Research Procedia*, vol. 30, pp. 90–100, 2018.

[12] S. S. Mofidi and J. A. Pazour, "When is it beneficial to provide freelance suppliers with choice? a hierarchical approach for peer-to-peer logistics platforms," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 126, pp. 1–23, 8 2019.

[13] H. Horner, J. Pazour, and J. E. Mitchell, "Optimizing driver menus under stochastic selection behavior for ridesharing and crowdsourced delivery," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 153, p. 102419, 9 2021.

[14] ——, "Increasing driver flexibility through personalized menus and incentives in ridesharing and crowdsourced delivery platforms," *Naval Research Logistics (NRL)*, 7 2024.

[15] M. Cerulli, C. Archetti, E. Fernández, and I. Ljubić, "A bilevel approach for compensation and routing decisions in last-mile delivery," *Transportation Science*, vol. 58, pp. 1076–1100, 9 2024.

[16] R. Ausseil, J. A. Pazour, and M. W. Ulmer, "Supplier menus for dynamic matching in peer-to-peer transportation platforms," *Transportation Science*, vol. 56, pp. 1304–1326, 9 2022.

[17] A. Behrendt, M. Savelsbergh, and H. Wang, "A prescriptive machine learning method for courier scheduling on crowdsourced delivery platforms," *Transportation Science*, vol. 57, pp. 889–907, 7 2023.

[18] ——, "Task assignment, pricing, and capacity planning for a hybrid fleet of centralized and decentralized couriers," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 160, p. 104533, 3 2024.

[19] J. Beardwood, J. H. Halton, and J. M. Hammersley, "The shortest path through many points," *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 55, pp. 299–327, 1959.

Pricing of last-mile vehicle routes in the shared economy

Marcel Goic
University of Chile
Santiago, Chile
mgoic@uchile.cl

Dimitri Loaiza
University of Chile
Santiago, Chile
dimitri.loaiza@ug.uchile.cl

Denis Saure
University of Chile
Santiago, Chile
dsaure@uchile.cl

***Abstract*—In recent years, advances in information technologies have significantly transformed the logistics systems firms use to distribute products to their customers. One of the most notable developments is the rise of digital platforms that match firms requiring delivery services with independent drivers for last-mile transportation. A key characteristic of these platforms is the absence of formal contractual relationships with drivers, allowing them to reject assigned routes. This makes the design of economic incentives essential to ensure sufficient operational capacity. To determine optimal pricing, platforms must account for route attractiveness, typically influenced by the number of packages and total travel distance. However, two opposing dynamics complicate this task: if prices are set too low, the platform risks failing to attract enough drivers to fulfill demand, incurring logistical penalties. Additionally, persistently low prices may discourage drivers from even logging onto the platform, leading to the need for higher prices in the future to re-engage supply. In this article, we propose a solution framework that combines a data-driven model to estimate drivers' price responsiveness with a simulation-based approach to identify optimal pricing strategies. Numerical experiments indicate that there is potential for price reductions without compromising service levels, a hypothesis we empirically assess in the field.**

Keywords—VRP, Online Platforms, crowd-shipping, last-mile logistics

I. Introduction

The rise of e-commerce has spurred innovative last-mile delivery solutions, with platforms like CitizenShipper, Amazon Flex, and Senpex leveraging crowdsourced drivers for on-demand delivery. These marketplaces face a unique challenge in pricing delivery routes due to the non-contractual nature of their driver pool. Unlike traditional centralized routing with obligated drivers, these platforms must incentivize independent drivers to accept proposed routes.

A critical challenge lies in determining optimal route prices. If the price offered for a route is too low, drivers may reject it, leading to unassigned deliveries. This necessitates potentially costly last-minute interventions to ensure packages reach their destinations. Conversely, setting prices too high erodes the platform's profit margins, impacting its overall financial performance. Furthermore, the platform's revenue model complicates pricing. While a fixed cost is typically charged per package to the end customer, drivers are compensated per route. This bundling of packages into routes is a deliberate strategy to prevent drivers from cherry-picking easier deliveries, which could leave less desirable routes unassigned.

Dynamic considerations also play a significant role in route pricing. Consistently low route prices can have long-term negative consequences. Firstly, the immediate need to deliver unassigned packages may require the platform to offer significantly higher prices later, incurring substantial overcosts. Secondly, persistently unattractive route prices can lead to driver attrition, reducing the available driver supply on subsequent days and potentially hindering the platform's ability to fulfill delivery demands efficiently. Therefore, the platform must navigate a delicate balance, setting route prices that are attractive enough to secure driver participation while maintaining profitability and ensuring the long-term viability of its driver network.

II. Pricing routes with crowdsourced drivers

A. Problem Setting

We study the pricing decisions in the shared economy in the context of a last-mile delivery platform that consolidates orders from multiple vendors and outsources transportation to a pool of non contractual, crowdsourced drivers. The platform operates as a centralized intermediary, assuming full responsibility for the fulfillment process, including the creation and pricing of delivery routes.

To improve efficiency and enhance driver engagement, the platform aggregates multiple packages into delivery routes. These routes are constructed to exploit spatial complementarities in demand, reducing redundant travel and increasing the value generated per unit of driver effort. Once the routes are defined, they are listed on the platform interface and made available to drivers. Each route listing includes key information such as the number of delivery points, geographic coverage, and total distance. Crucially, each route is posted with a fixed compensation offer, which drivers can review before voluntarily selecting a route.

Although route prices are determined individually, the platform uses a simple yet effective pricing logic composed of two main components: a fixed base payment a, and a per-package incentive b. Accordingly, the average compensation for a route with n packages is approximately modeled as $p(n) = a + b \cdot n$. This linear structure reflects the platform's operational trade-off between coverage costs and marginal delivery effort.

Importantly, not all routes are priced precisely according to this formula. There are two main sources of deviation. First, market conditions vary substantially from day to day and across different time windows. For example, during peak demand

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

periods, the platform faces increased delivery volume, requiring a higher number of active drivers. Despite relying on flexible, non contractual labor, the platform's capacity to dynamically scale supply is limited in the short term. This generates price pressures that are not fully captured by a static pricing function.

Second, the platform intentionally obscures the exact pricing components a and b. By withholding this decomposition, the platform aims to prevent drivers from inferring the marginal compensation structure, thereby avoiding potential strategic behavior that could affect participation decisions or prompt bargaining behavior. This opacity introduces further variation in observed prices relative to the benchmark linear model and serves as a strategic mechanism to retain pricing flexibility while managing the drivers' expectations.

This empirical context allows us to examine how variations in route characteristics and market conditions influence optimal pricing, and to test the effectiveness of alternative pricing schemes under realistic constraints of limited supply elasticity and information asymmetry.

B. Modelling Approach

a) Route Characterization.

Let $i = 1, ..., N$ index the set of delivery routes available on a given day. Each route consists of a set of packages, where each package has a defined pickup and delivery location within the city. Collectively, a route can be described by a vector of characteristics $\boldsymbol{x_i}=(x_{i1},x_{i2},\ldots, x_{iK})$, where each x_{ik} captures an attribute such as the number of packages, total route distance, estimated completion time, and geographic dispersion

b) Pricing Structure

Rather than assigning a unique price to each route, we assume that the platform uses a parametric pricing rule based on observable route characteristics. Although the mode can be extended to price based on an arbitrary set of attributes, we focus only on the total number of packages. Specifically, pricing is modeled as a linear function of the number of packages $p(n_i)=a+b\cdot n_i$ where n_i denotes the number of packages on route i, and a and b are the base price and per-package price, respectively.

c) Driver Behavior and Choice Sets

Drivers arrive sequentially to the platform and consider a limited set of available routes. Each arriving driver observes the first R routes currently listed, ordered either randomly or by platform heuristics. The value of R is calibrated using historical transaction data to reflect the empirical distribution of observed choices. Upon arrival, a driver selects one of the R routes or exits without choosing, based on route utility. Once selected, the route is removed from the platform and is no longer available for future drivers.

d) Arrival Process

The arrival of drivers is stochastic and depends on previous pricing behavior. Specifically, we assume a time-dependent arrival rate t, which is an increasing function of lagged average route prices. This captures the endogenous dynamics wherein higher compensation leads to greater driver availability over time. Importantly, the number of potential drivers per day is finite, and thus unassigned routes may remain unselected by the end of the day.

e) Route Choice Model

Driver choice behavior is modeled using a standard multinomial logit (MNL) framework. For driver d observing the choice set Rd, the utility of choosing route $i \in$ Rd is given by $u(d_i)=\theta_d\cdot x_i+d_i$, where x_i is the vector of observable route attributes (including price), θ_d captures drivers' preferences, and di is an i.i.d. extreme value error term.

f) Optimization Approach

The platform aims to minimize the total cost of assignment over a planning horizon, incorporating two dynamic elements (i) Fallback delivery cost (routes not selected by any driver must be fulfilled via a more costly external delivery service) and (ii) Endogenous arrival response **(**the arrival rate of drivers on future days depends on past price levels due to learning and expectation formation).

Due to the interdependence between pricing, driver arrival, and selection dynamics, the optimization problem is inherently nonlinear and difficult to solve analytically. We adopt a surrogate-based optimization framework. Specifically, we simulate the full system dynamics over a monthly horizon under candidate pricing parameters (a, b) and evaluate expected assignment costs in a coarse grid of values. We then approximate the cost function with a Gaussian Process that we use to efficiently search for the next evaluation point.

III. Data

The data we used to test the methodology comes from Wareclous, a platform that offers last-mile logistics services to a variety of e-commerce companies in Chile and Brazil. The data represent the operations of the platform in a single city from September to December 2023, encompassing the delivery of more than 75.000 packages. The data captures the two critical components of driver behavior: the connection of drivers to the platform, each one of them defining an acceptance possibility, and the actual choices of the drivers in each connection instance. Unlike other applications in which transportation is made by occasional drivers who agree to deviate from their regular paths ([2], [3]) in our setting the platform aggregates multiple packages in cohesive delivery routes and many of the drivers dedicate a large fraction of their working time to the transportation of packages. While on average the deliveries are performed by 32 drivers a day, in the observation period, we observe acceptance by 130 different drivers. In the dataset we observe arrivals of drivers to the platform to choose routes from the available alternative, as well as the characteristics of the routes offered.

IV. Results

A. Estimation of Driver's Behavior Parameters

There are two main models describing drivers' behavior: the arrival at the platform and the choice of routes once the driver is already connected. Parameters of these two models are displayed in Tables I and II respectively.

The authors acknowledge the support of Complex Engineering Systems Institute ANID PIA AFB220003. The first author also gratefully acknowledges partial funding by ANID/FONDECYT REGULAR 1221711 and the Institute for Research in Market Imperfections and Public Policy (IS130002 ANID).

TABLE I. PARAMETERS OF THE ARRIVAL MODEL

Table Column Head		
Parameter	***Value***	***Std. Error***
Intercept	-0.087	0.04
Days from last connection	-0.241	0.01
Last week income	0.016	0.0002

TABLE II. PARAMETERS OF THE CHOICE MODEL

Table Column Head		
Parameter	***Value***	***Std. Error***
Price	0.042	0.003
Number of Packages	-0.088	0.004
Distance	-0.009	0.002

In general, these estimates have the expected sign and are statistically significant. To validate these values indeed recover the most relevant facets of driver behavior, we simulate arrival and choices, and we compare the simulation against the actual values in four key metrics: daily number of routes taken, share of routes taken, number of connected drivers, and number of drivers who defect from the platform. These comparisons are displayed in Table I.

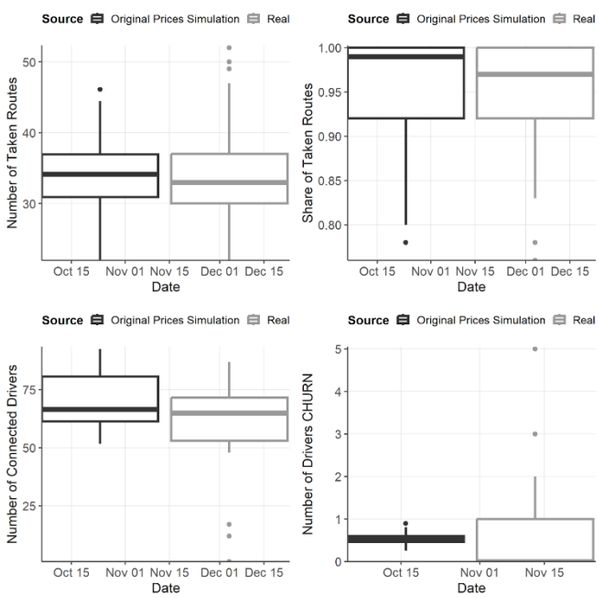


Fig. 1. Comparison of Simulated vs Actual data in key metrics.

In general, the estimation replicates the observed prices, and we observe no systematic differences in any of the metrics, which gives us confidence to use the simulated system to search for optimal prices.

B. *Optimal Prices*

Due to the dynamic effects, optimal prices depend on a relatively long sequence of days. For a given sequence, we simulate the corresponding cost, and we numerically optimize over this simulated cost function. As we repeat multiple times, we obtain a distribution of prices that we display in Figure 2 and summarize in Table III. These results suggest that the platform could reduce prices, improving operational costs without significantly hurting future performance.

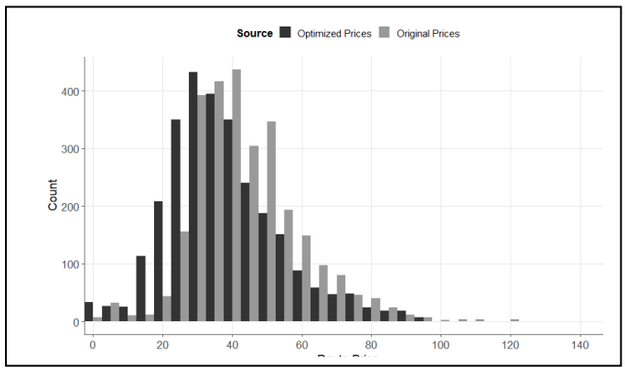


Fig. 2. Example of a figure caption. (*figure caption*)

TABLE III. OPTIMAL PRICING POLICY

Table Column Head		
Parameter	***Value***	***Std. Error***
Base Price	9.19	0.49
Price per Package	0.94	1.33
Price per Kilometer	0.31	0.04
Total Route Price	43.9	37.6

V. DISCUSSION

We have proposed a methodology that captures the main tradeoffs involved when pricing last-mile transportation services in the shared economy. When applying the methodology to an actual case, we show the platform can reduce operation costs in an order of 15%. In a follow-up study, we observe a reduction of prices in a similar magnitude, and the responses of drivers are in line with predictions of the simulated model.

REFERENCES

[1] Koziel, S., & Leifsson, L. (2013). *Surrogate-based modeling and optimization*. New York: Springer.

[2] Archetti, C., Guerriero, F., & Macrina, G. (2021). The online vehicle routing problem with occasional drivers. *Computers & Operations Research*, *127*, 105144.

[3] Macrina, G., Pugliese, L. D. P., Guerriero, F., & Laporte, G. (2020). Crowd-shipping with time windows and transshipment nodes. *Computers & Operations Research*, 113, 104806.

Session N°7 – Track N°3

Network Design and Location

Chair: Hashemkhani-Zolfani, S. *(Universidad Católica del Norte)*
Place: G6-056
Time: 14:00 – 15:15

Solving the p-Median Problem with Non-Euclidean Metrics: A High-Performance Matheuristic Approach

Time: 14:00 – 14:15
Authors:

- Gómez-Rocha, J. *(Tecnologico de Monterrey)*
- Salazar-Treviño, E. *(Universidad Autónoma de Nuevo León)*
- Camacho-Vallejo, J. *(Tecnológico de Monterrey)*

Localización y Asignación de Contenedores para la Recolección Colaborativa de Residuos Domiciliarios Reciclables en Cerro Navia y Quinta Normal en Santiago, Chile

Time: 14:20 – 14:35
Authors:

- Moreno, V. *(Universidad Andrés Bello)*
- Blázquez, C. *(Universidad Andrés Bello)*

Cadena de Suministro como Sistema Complejo: Un Enfoque Sistémico-Cibernético para Gestionar la Resiliencia

Time: 14:40 – 14:55
Authors:

- Olivera-Roja, F. *(Universidad de Antofagasta)*
- Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tabilo-Álvarez, J. *(Universidad Católica del Norte)*

ARAS Neutrosófico Multi-Valorado para Priorizar Estrategias de Adaptación al Cambio Climático en la Agricultura Olivícola de Pequeños Productores

Time: 15:00 – 15:15
Authors:

- Montenegro-Dos Santos, F. *(Universidad Católica del Norte)*
- Hashemkhani-Zolfani, S. *(Universidad Católica del Norte)*

Solving the p-Median Problem with Non-Euclidean Metrics: A High-Performance Matheuristic Approach

1st José Emmanuel Gómez-Rocha
Tecnologico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias
Monterrey, México
emmanuel.gr@tec.mx

2nd Eduardo Salazar-Treviño
Universidad Autónoma de Nuevo León
Monterrey, México
eduardo.salazartr@uanl.edu.mx

3rd José-Fernando Camacho-Vallejo
Tecnologico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias
Monterrey, México
fernando.camacho@tec.mx

***Abstract*—In this work, we study the p-median problem, an extensively researched problem in discrete location theory and combinatorial optimization, under non-Euclidean distance metrics. The problem becomes particularly challenging in the presence of asymmetric distances and when the sets of potential facility locations and customer sites are not identical.We propose a two-phase matheuristic. In the first phase, an initial solution is generated using either a hybrid heuristic or a Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP). The parallelization strategy consists of executing independent GRASP iterations across multiple threads, sharing only the best solution found. In the second phase, a Benders decomposition scheme is applied to improve the incumbent solution, embedded within a Branch-and-Cut algorithm. In addition, valid inequalities are incorporated to strengthen the master problem and a set of compact linear subproblems are generated. To evaluate the performance of the proposed matheuristic, we compare the results obtained with the best-known solutions reported in the literature for instances with non-Euclidean distances and does not satisfy the triangle inequality. Our computational experiments demonstrate that the proposed method outperforms the best-known approaches from the literature by identifying new best-known solutions for several instances and proving optimality for instances that had not previously been solved to optimality. Moreover, our method requires less computational time to achieve these results.**

***Index Terms*—p-Median; Facility Location; Combinatorial Optimization; GRASP; Benders Decomposition**

I. Introduction

The p-median problem (pMP) is a classical problem in location science and is well known to be $\mathcal{NP}$-hard (1). Various problems in location analysis can be formulated as special cases of the pMP (2). However, most of these methods struggle to efficiently handle large-scale instances, and in many cases, the computations exceed available memory, as shown in (3). Moreover, the literature on the pMP with asymmetric distances remains rather limited.

II. Solution methods

Motivated by the aforementioned challenges in efficiently solving the pMP under non-Euclidean distance metrics, particularly in cases where the triangle inequality is not satisfied, we propose a matheuristic framework that combines heuristics procedures, namely POPSTAR and GRASP with a Benders decomposition approach enhanced by valid inequalities. This hybrid approach is designed to generate high-quality solutions for such complex instances.

III. Experimental results

To evaluate our proposed approach, we consider the RW instances for the pMP. We then perform a direct comparison with the best-known objective function values reported in literature, which are obtained using a two-phase Benders decomposition based on the most efficient formulation, with the POPSTAR method used as a warm-start. Computational experiments on RW instances validate our approach. It is worth emphasizing that we have improved some of the previously best-known objective function values, achieving new best results for certain instances. Additionally, we have verified the optimality of some RW instances for the first time and have strengthened their dual bounds.

IV. Conclusions

Our computational experiments demonstrate the effectiveness of the proposed matheuristic in solving the set of RW instances and demonstrates that combining metaheuristics with exact decomposition methods can effectively tackle problem instances that are intractable for pure exact or heuristic approaches alone. Overall, our matheuristic found new best-known values for 5 instances, proved optimality for 1 instance previously unsolved, and improved MIP gaps for 7 instances.

References

[1] Kariv, Oded and Hakimi, S Louis. An algorithmic approach to network location problems. I: The p-centers.

SIAM journal on applied mathematics, (pp. 513-538). SIAM, 1979.

[2] Marín, Alfredo and Pelegrín, Mercedes. p-Median problems. *Location science*, (pp. 25-50). Springer, 2019.

[3] Duran-Mateluna, Cristian and Alès, Zacharie and Elloumi, Sourour. An efficient benders decomposition for the p-median problem. *European Journal of Operational Research*, (pp. 84-96). Elsevier, 2023.

Localización y asignación de contenedores para la recolección colaborativa de residuos domiciliarios reciclables en Cerro Navia y Quinta Normal en Santiago, Chile

Valentina Moreno
Facultad de Ingeníería
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
v.morenosoto2@uandresbello.edu

Dra. Carola Blázquez
Departamento Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Viña del Mar, Chile
cblazquez@unab.cl

***Resumen*—En este estudio, se utiliza un modelo de programación lineal entera mixta para resolver el problema de localización/asignación de contenedores de residuos domiciliarios reciclables usando flujo único en espacios públicos en las comunas de Cerro Navia y Quinta Normal en Santiago, Chile. De esta manera, se determina el número de contenedores a ser instalados en los espacios públicos seleccionados para realizar el acopio de estos residuos y la asignación de los habitantes a dichos espacios públicos dentro de una distancia máxima de traslado respetando la capacidad de los contenedores. El problema se resuelve para cada comuna por separado y además en conjunto para propiciar la colaboración entre las comunas en la recolección de residuos domiciliarios reciclables, donde se comparten los recursos y sitios de recolección de residuos reciclables. Los resultados indican que el trabajo mancomunado entre municipalidades reduce los costos totales de contenedores y las distancias promedio de traslado de los ciudadanos a los sitios de acopio en los espacios públicos seleccionados, mejorando así la eficiencia de la recolección y el servicio a la comunidad. En trabajo futuro, se implementará un sistema de recolección utilizando un flujo múltiple, donde se usa un contenedor diferente para cada tipo de residuo reciclable. Los resultados de este estudio aportan a la planificación municipal para mejorar la gestión de residuos reciclables y así incentivar la participación ciudadana y a la vez cumplir con las políticas ambientales del país y las metas de desarrollo sustentable.**

***Index Terms*—residuos domiciliarios reciclables, localización, asignación, contenedores, colaboración**

Cadena de Suministro como Sistema Complejo: Un Enfoque Sistémico-Cibernético para Gestionar la Resiliencia

1st Felipe Olivera Rojas
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Antofagasta
Antofagasta, Chile
felipe.olivera@uantof.cl

2nd Francisco J. Tapia-Ubeda
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
francisco.tapia@ucn.cl

3rd Jorge Tabilo Álvarez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
jtabilo@ucn.

Abstract— **Las cadenas de suministro enfrentan crecientes niveles de complejidad e incertidumbre producto de fenómenos globales como crisis sanitarias, disrupciones logísticas y transformaciones tecnológicas. Esta investigación propone un enfoque teórico-metodológico que conceptualiza las cadenas de suministro como sistemas complejos viables, apoyado en el Modelo de Sistema Viable (VSM) desarrollado por Stafford Beer y ampliado por Raúl Espejo. Desde esta perspectiva cibernética, se busca caracterizar las capacidades de autorregulación, aprendizaje y adaptación de las redes logísticas frente a entornos dinámicos. El modelo permite observar la estructura funcional de la cadena como un sistema compuesto por subsistemas interdependientes que interactúan en distintos niveles organizacionales. Se discuten las implicancias de la Ley de la Variedad Requerida de Ashby como fundamento para gestionar la complejidad interna y externa, y se postula una metodología orientada a diagnosticar la viabilidad y resiliencia mediante el mapeo funcional de las cinco funciones sistémicas del VSM: implementación, coordinación, control, inteligencia y política. Este enfoque contribuye al diseño de cadenas de suministro más resilientes y sostenibles, promoviendo estructuras de decisión distribuidas, autonomía local con cohesión global y mecanismos efectivos de comunicación.**

Keywords— Gestión de la Cadena de Suministro; Sistema Complejo; Modelo de Sistema Viable

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de la cadena de suministro enfrenta crecientes desafíos derivados de la complejidad organizacional, ambiental y social [1]. Esta complejidad se manifiesta en diversas dimensiones: estructural (cantidad de proveedores, productos y niveles jerárquicos), operativa (procesos logísticos, tecnologías interdependientes, flujos de información) y contextual (volatilidad del entorno, regulaciones cambiantes, eventos disruptivos) [2], [3]. Estas características implican que las cadenas modernas no pueden ser gestionadas eficazmente bajo los enfoques tradicionales.

La aceleración de fenómenos como la globalización, digitalización y crisis recurrentes (como la pandemia de COVID-19) ha evidenciado la necesidad de estructuras organizativas más resilientes, adaptativas y sostenibles [4]. Frente a entornos cada vez más inciertos, las organizaciones deben desarrollar capacidades internas de autoorganización, coordinación distribuida y aprendizaje continuo [5].

En este contexto, el VSM, desarrollado por Stafford Beer [6] y ampliado por Raúl Espejo [7], ofrece una herramienta teórica y práctica para observar, diagnosticar y rediseñar cadenas de suministro como sistemas organizacionales complejos. El VSM interpreta las organizaciones como sistemas recursivos y autorregulados, capaces de gestionar su propia complejidad mediante cinco funciones sistémicas interrelacionadas: implementación, coordinación, control, inteligencia y política.

II. PROPUESTA METODOLÓGICA

A partir de la literatura revisada y la experiencia en la aplicación del VSM en entornos industriales, se propone una metodología para el análisis y rediseño de cadenas de suministro complejas que integre los principios de la cibernética organizacional con los enfoques estructurales y tácticos de la gestión de resiliencia en Gestión de la cadena de suministro (SCM), particularmente desde los modelos de resiliencia en SCM presentados en la literatura reciente [8]. En este trabajo se busca responder la pregunta de investigación: ¿Cómo integrar los principios del Modelo del Sistema Viable con los enfoques de resiliencia en SCM para diagnosticar y rediseñar cadenas de suministro como sistemas complejos?

La contribución inmediata de esta investigación se centra en una revisión de literatura sobre sistemas complejos y escuelas de pensamiento (incluyendo la escuela dinámica) que permite establecer la base conceptual de la metodología propuesta. La aplicación en un caso de estudio se proyecta como trabajo futuro, lo que permitirá ilustrar la factibilidad y utilidad del enfoque en contextos reales. Alternativamente, se prevé contrastar los resultados con instancias benchmark utilizadas en la literatura de resiliencia en SCM.

En la Figura 1 se observa cómo las funciones sistémicas del VSM (S1 a S5) se corresponden con capacidades clave para la resiliencia estructural y operacional en SCM:

- S1: Operaciones → Gestión de flujos e inventarios
- S2: Coordinación → Descentralización táctica
- S3: Control → Planificación basada en escenarios
- S4: Inteligencia → Diseño estructural multinivel
- S5: Política → Propósito sistémico y resiliencia estructural

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

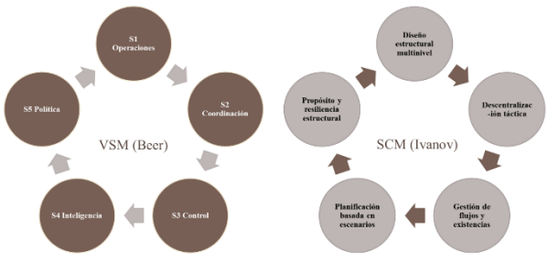


Figura 1:Integración entre el Modelo del Sistema Viable (VSM) y SCM resiliente (Ivanov, 2024)

Esta correspondencia permite observar la cadena de suministro no solo como una red física de actores y flujos, sino como un sistema organizacional viable, compuesto por subsistemas autónomos con capacidad de adaptación local y coherencia global.

La metodología se estructura en cinco etapas:

1. Delimitación del sistema y definición de propósito

   Se identifican los límites del sistema en estudio, sus objetivos de negocio, su entorno relevante y sus funciones críticas. Aquí se recoge el propósito sistémico como base de la viabilidad (System 5).

2. Caracterización estructural multinivel

   Siguiendo los lineamientos de la literatura sobre resiliencia en SCM (Ivanov, 2024) [9], se realiza un análisis de la arquitectura organizacional y técnica de la cadena (nodos, relaciones, niveles), lo que corresponde a System 4 (inteligencia). Esta caracterización permite modelar las capacidades de anticipación y adaptación.

3. Análisis funcional según el VSM

   Se identifican y mapean los subsistemas que cumplen funciones operativas (System 1), los mecanismos de coordinación entre ellos (System 2), y los sistemas de control que regulan su desempeño (System 3). Se incorporan herramientas como SysML o mapeos de procesos para este diagnóstico.

4. Evaluación de resiliencia y complejidad

   Se utilizan indicadores como variedad estructural, interdependencia, flexibilidad táctica y capacidades de aprendizaje para evaluar tanto la resiliencia operacional como la estructural. Aquí se pueden aplicar herramientas de planificación basada en escenarios (System 3–4).

5. Rediseño sistémico

   Con base en el diagnóstico anterior, se plantean ajustes en las funciones sistémicas, promoviendo una descentralización táctica con control cibernético, es decir, otorgando autonomía a las unidades operativas (S1) sin perder coherencia global, gracias a mecanismos efectivos de coordinación, retroalimentación y alineamiento estratégico (S2–S5).

Este enfoque metodológico permite trascender el enfoque tradicional de control logístico y avanzar hacia una ingeniería de la viabilidad [9], donde las cadenas de suministro son concebidas como sistemas vivos capaces de sobrevivir y evolucionar en entornos turbulentos.

REFERENCES

[1] B. S. Silvestre, “Sustainable supply chain management in emerging economies: Environmental turbulence, institutional voids and sustainability trajectories,” *Int J Prod Econ*, vol. 167, pp. 156–169, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.05.025.

[2] Y. Bar-Yam, “Multiscale variety in complex systems,” *Complexity*, vol. 9, no. 4, pp. 37–45, 2004, doi: 10.1002/cplx.20014.

[3] L. Crump, “Tools for managing complex negotiations,” *International Negotiation*, vol. 25, no. 1, pp. 151–165, 2020, doi: 10.1163/15718069-23031162.

[4] F. Liu, C. Liu, X. Wang, K. Park, and M. Fang, “Keep concentrated and carry on: redesigning supply chain concentration in the face of COVID-19,” *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 27, no. 10, pp. 1681–1704, 2024, doi: 10.1080/13675567.2023.2175803.

[5] T. Ahmadi, A. F. Hesaraki, and J. P. M. Morsch, “Exploring IT-driven supply chain capabilities and resilience: the roles of supply chain risk management and complexity,” *Supply Chain Management*, vol. 30, no. 1, pp. 50–66, Feb. 2025, doi: 10.1108/SCM-11-2023-0561.

[6] S. Beer, “The Heart of Enterprise,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 31, no. 9, p. 861, 1980, doi: 10.1057/jors.1980.155.

[7] R. Espejo and A. Reyes, *Organizational Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-19109-1.

[8] A. Dolgui and D. Ivanov, “Ripple effect and supply chain disruption management: new trends and research directions,” 2021, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/00207543.2021.1840148.

[9] D. Ivanov, “Supply chain resilience: Conceptual and formal models drawing from immune system analogy,” *Omega (United Kingdom)*, vol. 127, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.omega.2024.103081.

ARAS Neutrosófico Multi-Valorado para Priorizar Estrategias de Adaptación al Cambio Climático en la Agricultura Olivícola de Pequeños Productores

Fernando Montenegro Dos Santos
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
fernando.montenegro@ce.ucn.cl

Sarfaraz Hashemkhani Zolfani
Escuela de Ingeniería
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, Chile
sarfaraz.hashemkhani@ucn.cl

***Resumen*—La agricultura olivícola de pequeños productores en regiones áridas y semiáridas es altamente vulnerable a la escasez de agua, las sequías prolongadas y la variabilidad climática. Este estudio propone un marco de soporte a la decisión que integra los Números Neutrosóficos Multi-Valorados (MVNN) con el método de Evaluación por Relación Aditiva (ARAS) para abordar problemas de toma de decisiones multicriterio (MCDM) bajo incertidumbre. El enfoque MVNN-ARAS permite la agregación de opiniones de expertos capturando la imprecisión e indeterminación en la evaluación de estrategias de adaptación al cambio climático. Se realiza un estudio de caso con cuatro expertos y seis criterios de evaluación en la Región de Coquimbo, Chile. Los resultados muestran que el uso de cultivares de olivo resistentes a la sequía y la implementación de sistemas de riego por goteo son las estrategias más efectivas, mientras que los sistemas comunitarios de distribución de agua podrían volverse viables cuando se combinan con gobernanza participativa y conocimiento local. El método proporciona información transparente, robusta y práctica para guiar la asignación de recursos y la planificación agrícola resiliente al clima.**

***Palabras clave*—Toma de decisiones multicriterio, MVNN, ARAS, Adaptación al cambio climático, Agricultura olivícola, Gestión del agua**

I. Resumen Extendido

El cambio climático intensifica la escasez de agua y amenaza la sostenibilidad de los sistemas agrícolas de pequeños productores en zonas áridas y semiáridas [1]. En particular, los pequeños olivicultores de la Región de Coquimbo, Chile, enfrentan sequías prolongadas, disminución de la disponibilidad de aguas subterráneas y un acceso limitado a tecnologías adaptativas. Este estudio introduce un marco que combina Números Neutrosóficos Multi-Valorados (MVNN) con el método ARAS para priorizar estrategias de adaptación al cambio climático bajo incertidumbre.

Los MVNN extienden la teoría neutrosófica clásica al representar evaluaciones con grados multi-valorados de verdad, indeterminación y falsedad [2]. Esto permite integrar opiniones de expertos diversas, incluso en presencia de información incompleta o conflictiva. ARAS se aplica para agregar estas evaluaciones, normalizar los criterios y calcular los valores esperados ($s(a_i)$), las puntuaciones normalizadas ($s(a_i)'$) y los índices de utilidad relativa (U_i) para cada alternativa de adaptación.

La evaluación de diez estrategias de adaptación para el olivo en la Región de Coquimbo, Chile, se realizó mediante un panel de cuatro expertos. El análisis se basó en seis criterios: viabilidad económica, sostenibilidad ambiental, factibilidad técnica, aceptabilidad social, mejora de la resiliencia y potencial de mercado. Los resultados muestran que los cultivares de olivo resistentes a la sequía (a_2, $s(a_2) = 0.927$) y los sistemas de riego por goteo (a_1, $s(a_1) = 0.890$) alcanzan las mayores puntuaciones de utilidad por su impacto directo en la eficiencia hídrica y la resiliencia. Por el contrario, los sistemas comunitarios de distribución de agua (a_8) ocupan inicialmente posiciones más bajas ($s(a_8) = 0.856$) debido a desafíos organizativos y de gobernanza. Sin embargo, experiencias de gestión comunitaria de aguas subterráneas muestran que la adopción de normas colectivas de uso puede permitir a los agricultores adaptar sus prácticas de riego y evitar la sobreexplotación de los acuíferos [3].

El marco MVNN-ARAS demuestra su valor como herramienta estructurada, transparente y robusta para la planificación de la adaptación climática. Como trabajo futuro, se propone integrar modelos espaciales-climáticos, mecanismos de ponderación basados en la participación de actores locales y análisis comparativos con otros métodos MCDM (por ejemplo, TOPSIS, VIKOR) para mejorar su aplicabilidad en contextos agrícolas más amplios.

References

[1] G. A. Bogale, A. K. Kassa, and M. M. Maja, "Changes in climate extreme indices and agricultural drought monitoring in the semi-arid areas of Borana zone, southern Ethiopia," *Heliyon*, vol. 11, no. 2, p. e42041, 2025

[2] Peng, J., & Wang, J.-Q., "Multi-valued neutrosophic sets and its application in multi-criteria decision-making problems," *Neutrosophic Sets and Systems*, 2015.

[3] Raina, R. S., & Longino, H."Community Groundwater Management in Andhra Pradesh: Lessons for Sustainable Agriculture," *Studies in History and Philosophy of Science*, 2025.

Session N°7 – Track N°4

Operations Research Applications

Chair: Dávila-Gálvez, S. *(Universidad de Santiago de Chile)*
Place: X-103
Time: 14:00 – 15:15

Estimación Causal de Elasticidades Precio de la Demanda para Optimización de Precios en Categorías Multiproducto en Supermercado

Time: 14:00 – 14:15
Authors:

- Saavedra-Ormazábal, P. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Aburto-Lafourcade, L. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*

Optimización de Ingresos en la Economía Compartida: Políticas de Precios Dinámicos - Un Estudio de Caso de Airbnb

Time: 14:20 – 14:35
Authors:

- Galaz, P. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Díaz, V. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Pizarro, D. *(Toulouse Business School)*

The Good, the Bad, and the Ugly: Police Space-Based Disruptions to Thwart Transactions in Retail Illicit Drug Markets

Time: 14:40 – 14:55
Authors:

- Dávila-Gálvez, S. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Escalona, P. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Brotcorne, L. *(Université de Lille)*

Optimización Cuántica Variacional de la Planificación Minera con Restricciones de Precedencia y Capacidad: Aplicación del Algoritmo VQE

Time: 15:00 – 15:15
Authors:

- Leonario-Marambio, M. *(Universidad Católica del Norte)*
- Quelopana, A. *(Universidad Católica del Norte)*

Estimación causal de elasticidades precio de la demanda para optimización de precios en categorías multiproducto en supermercado

Pía Saavedra Ormazábal
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
pisaavedra@alumnos.uai.cl

Luis Aburto Lafourcade
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
luis.aburto@uai.cl

***Abstract*—Las decisiones de precios para maximizar ganancias en supermercados dependen fuertemente de prever cómo reaccionarán los clientes ante variaciones en los precios, para lo cual se estiman las elasticidades precio de la demanda. Esta investigación busca identificar y cuantificar el costo de oportunidad de utilizar distintos métodos de machine learning para estimar elasticidades que serán usadas en optimización prescriptiva. Para lograr esto, se utilizan datos de una cadena de supermercados chilena para aplicar regresión lineal, regularización Lasso, regresión robusta y *double machine learning* con el fin de estimar elasticidades para utilizarlas en un modelo de optimización de precios prediciendo la demanda de los productos. Se observa que la elección del método de estimación impacta en las decisiones óptimas de precios y en la ganancia esperada, siendo el modelo causal el más realista.**

***Index Terms*—Predicción de demanda, modelos causales, pricing, optimización prescriptiva, machine learning.**

I. Introducción

Los supermercados venden productos dirigidos al público en general, con vida útil corta, de consumo rápido y, por tanto, de venta rápida, los cuales se conocen como *Fast Moving Consumer Goods* (FMCG). Estos tienen demanda incierta mayormente afectada por la respuesta de los consumidores frente a cambios en los precios de los productos, tanto del producto en sí por la sensibilidad al precio de los clientes, como por la variación del precio de otros artículos.

Conocer la relación entre la demanda y los precios de productos, es decir, sus elasticidades, es información valiosa para las empresas ya que les permite prever la reacción de los clientes ante cambios en los precios, y así crear estrategias de precios considerando los efectos sustitutivos y complementarios de los productos para ser empresas competitivas en el mercado [1].

Por ejemplo, para la estrategia de promociones aplicando descuentos sobre el precio del producto, se debe decidir si las ganancias por vender más unidades compensa la perdida por vender a menor precio [2]. Es importante que la decisión sea lo menos subjetiva posible para garantizar resultados deseables y eficientes sobre las ganancias de la empresa [3]. Para lo cual es necesario estimar las elasticidades precio de la demanda para conocer el impacto que tendrá un menor precio sobre la cantidad de unidades a vender.

Con una estimación de elasticidades se podría realizar una toma de decisiones informada para maximizar las ganancias esperadas al tener un aproximado de cómo reaccionarán los consumidores dado el precio de los productos. Sin embargo, en [4] se realizaron experimentos de precios aleatorios a gran escala en una cadena de supermercados en Estados Unidos, donde demostraron que las elasticidades calculadas con precios observacionales son significativamente más negativas que la estimación de elasticidades calculadas con precios experimentales. Esto implica que el modelo de optimización asigna precios considerando que, por cada unidad monetaria que disminuye el precio, más unidades de producto se venderán que en la realidad. Esto se conoce como sesgo optimista, lo cual es que la estrategia óptima obtiene resultados esperados considerablemente mejores a los resultados alcanzados al implementar la estrategia óptima en la realidad, esto provoca que las empresas incurran en costos de prueba y error para encontrar una estrategia de precios realmente óptima, a pesar de que estos costos son los que las empresas pretenden evitar al utilizar herramientas de optimización prescriptiva [5]. Por lo que la correcta estimación de elasticidades es compleja e importante para realmente maximizar las ganancias del supermercado. Dado esto, se quiere identificar el costo de utilizar estimaciones no causales de elasticidades en la decisión óptima al realizar optimización prescriptiva de precios, y validar las elasticidades estimadas con datos observacionales y las estimadas con datos experimentales.

El análisis se hará gracias a que una cadena de supermercados chilena facilitó sus datos semanales de los productos de las categorías de aceite desde 2023 a junio 2025. La información entregada contiene el precio promedio, costo promedio, unidades vendidas, descripción de productos y SKU, además de los datos de campañas promocionales donde se especifica la vigencia de la promoción, la mecánica (oferta unitaria, porcentaje de descuento, 2 por, etc), los productos a considerar y el medio de pago necesario. Para cada categoría se seleccionó los 14 productos con más ventas durante el 2024.

II. Metodología

A. Estimación de elasticidades

Para estimar las elasticidades de cada producto se consideró el logaritmo de su demanda en función del logaritmo de los precios de sí mismo y de los demás productos y de variables categorías que indican si el producto estuvo en promoción durante la semana, si fue fin de mes y si fue semana santa.

Se realizaron cuatro métodos para obtener las elasticidades: (1) regresión lineal de mínimos de cuadrados ordinarios (OLS) dado que es una herramienta fácil de modelar e interpretar y es un modelo utilizado como benchmark para comparaciones y clásico en econometría. (2) Regularización Lasso dado que penaliza con selección de variables para manejar la alta dimensionalidad y evitar el sobreajuste. (3) Regresión robusta (RLS) dado que limita el impacto de outliers en la estimación [6]. Y (4) *double machine learning* (DML) dado que combina la flexibilidad de *machine learning* con herramientas de inferencia causal permitiendo la estimación causal de elasticidades [7]. Esta selección de modelos abarca tanto enfoques clásicos y fáciles de interpretar como técnicas modernas y robustas, lo que permite que el análisis de comparación sea integral.

B. Experimentos

Dadas las conclusiones de [4], se realizaron experimentos de precios para validar las estimaciones de elasticidades obtenidas con los modelos causales al utilizar datos observacionales, teniendo en cuenta las limitantes de tiempo y de campañas promocionales ya existentes en el supermercado.

Los experimentos se realizaron en la tienda de la región Metropolitana que más ganancia obtuvo en la categoría de aceite durante el 2024. Se seleccionaron 6 productos, centrándose en los productos a los que no se pudo estimar su elasticidad propia. El experimento es por un tiempo de 4 semanas. Se estableció un precio bajo y un precio alto para cada producto con el fin de verificar la reacción de los clientes en los extremos de la curva de demanda. Durante 2 semanas se mantuvieron los precios bajos y luego se asignaron los precio altos. Fig. 1 muestra la curva de demanda de un producto que no se pudo estimar su elasticidad, donde los precios asignados para experimentar fueron de $\$1390$ y $\$1500$.

La información obtenida a partir de los experimentos de precios será utilizada como nuevos datos en los modelos para estimar elasticidades con datos experimentales, lo cual permitirá evaluar y comparar la estimación de cómo responden los consumidores a distintos niveles de precios en un entorno experimental con lo obtenido con datos observacionales.

Para calcular el costo de utilizar malas elasticidades se considerará como verdad fundamental al método de estimación que menor error porcentual absoluto medio (MAPE) obtenga al realizar validación cruzada con 5 *folds*. Se utilizarán los precios óptimos obtenidos con las elasticidades malas en el cálculo de ganancia considerando los coeficientes estimados con el mejor modelo, para identificar y cuantificar el costo de utilizar elasticidades erróneas.

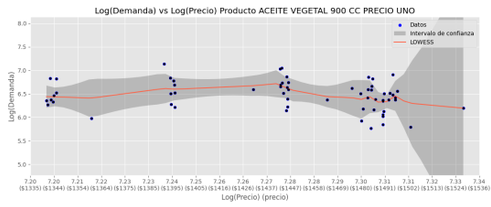


Fig. 1. Gráfico de logaritmo de demanda versus logaritmo de precio para producto que no se estimó su elasticidad propia

C. Modelo de optimización

En cuanto al modelo de optimización de precios se considera el conjunto $N = \{1, 2, ..., n\}$ de productos de una misma categoría incluidos en la estrategia de precios, el precio p_i del producto $i \in N$ debe ser mayor a su costo c_i (2), además de ser mayor a su precio mínimo histórico de los últimos 6 meses p_i^{min} y menor a su precio máximo histórico de los últimos 6 meses p_i^{max} (3). También, se define un valor $h \in [0, 1]$ tal que el precio a asignar pueda cambiar en $h\%$ respecto al último precio asignado u_i (4), de esta manera se controla la percepción del cambio de precios. El objetivo de la optimización es maximizar la ganancia total de la categoría (1) considerando que la demanda q_i del producto i depende de todos los precios a asignar, por lo que q_i es predicha con la estimación de elasticidades.

$$\max \sum_{i \in N} (p_i - c_i) \cdot q_i \tag{1}$$

$$c_i \leq p_i \qquad \forall i \in N \tag{2}$$

$$p_i^{min} \leq p_i \leq p_i^{max} \qquad \forall i \in N \tag{3}$$

$$(1 - h) \cdot u_i \leq p_i \leq (1 + h) \cdot u_i \qquad \forall i \in N \tag{4}$$

$$p_i, q_i \geq 0 \qquad \forall i \in N \tag{5}$$

$$\tag{6}$$

III. Resultados

A. Elasticidades

Tabla 1 contiene las elasticidades propias significativas estimadas por cada método."–" indica que el modelo no pudo estimar significativamente la elasticidad propia del producto.

B. Experimentos

El experimento de cambios de precios en una tienda de supermercado actualmente está en curso, por lo que aún no se puede comparar la estimación de elasticidades con datos experimentales y datos observacionales.

Al realizar validación cruzada, OLS obtuvo MAPE de 119.82%, Lasso de 121.7%, RLS de 161% y DML de 101.28%, por lo que se considerará a DML como verdad fundamental. Cuantificando el costo de utilizar las elasticidades erróneas en vez de utilizar el métodos causal, se obtiene que al considerar los precios óptimos según OLS la ganancia sería 25.77% menor que la ganancia óptima alcanzada por

los precios óptimos de DML. Al utilizar los precios óptimos según Lasso se obtiene una ganancia 5.14% menor que las alcanzadas por DML. Utilizando los precios óptimos de RLS se obtiene ganancia 7.53% menor que la obtenida con DML.

C. Optimización

Para la resolución del problema de optimización se utilizó el solver Gurobi con computación de alto rendimiento (HPC). Para los productos sin estimación de elasticidad propia significativa se mantuvo el último precio observado. La solución óptima de cada modelo se encuentra en Tabla 2 representadas por el cambio porcentual del precio óptimo respecto al último precio observado del producto.

Tabla 3 contiene el cambio porcentual de las optimizaciones respecto a la última semana observada en las métricas agregadas de precio ponderado, venta y ganancia.

IV. Discusión

Los resultados muestran que la elección del modelo para estimar elasticidades tiene un impacto relevante en la decisión de precios, lo cual genera costos de oportunidad si se utilizan estimaciones alejadas de la realidad.

TABLE I
TABLA DE ELASTICIDADES PROPIAS

SKU	OLS	Lasso	RLS	DML
Vegetal marca propia 900 cc	-5.79	-3.82	-5.35	-3.34
Vegetal 1 lt belmont	-4.73	-4.00	-4.87	-3.88
Maravilla 1 lt chef	-3.62	-1.82	-3.43	-3.90
Oliva 500 cc. chef	-2.59	-1.92	-3.42	-1.85
Vegetal precio uno 1.5 lt	–	–	–	–
Maravilla natura 1 lt.	-4.90	-3.94	-4.97	-5.00
Oliva marca propia 500 ml	–	-0.97	–	-3.64
Oliva marca propia 1000 ml	-3.34	-2.02	-3.16	-2.91
Oliva 500 cc. banquete	-1.68	-0.46	-2.98	-2.23
Maravilla miraflores 900 ml	-5.33	-4.63	-4.99	-4.51
Maravilla marca propia 900 ml	-3.92	-2.57	-4.38	-4.53
Oliva 1 lt chef	-2.65	-1.26	-3.02	-2.48
Oliva marca propia2 1000 ml	–	-1.42	-3.10	-2.86
Vegetal natura 900 ml	-3.04	-2.21	-2.15	-2.11

TABLE II
TABLA DE CAMBIO PORCENTUAL DE PRECIO ÓPTIMO

SKU	OLS	Lasso	RLS	DML
Vegetal marca propia 900 cc	-0.7	-7.2	8.9	10
Vegetal 1 lt belmont	2.6	10	-9.5	-9.3
Maravilla 1 lt chef	-3.8	-10	-10	-1.8
Oliva 500 cc chef	-2.2	10	6.6	10
Vegetal precio uno 1.5 lt	–	–	–	–
Maravilla natura 1 lt	-10	3.9	-5.2	3.9
Oliva marca propia 500 ml	–	-10	–	-10
Oliva marca propia 1000 ml	10	10	10	10
Oliva 500 cc banquete	2.6	2.6	2.6	2.6
Maravilla miraflores 900 ml	3.9	-10	-10	-10
Maravilla marca propia 900 ml	1.9	-10	1.9	-10
Oliva 1 lt chef	-9	1.1	-9	-9
Oliva marca propia2 1000 ml	–	10	10	10
Vegetal natura 900 ml	0	-10	0	-10

TABLE III
CAMBIOS PORCENTUALES ÓPTIMOS RESPECTO A ÚLTIMA SEMANA

Modelo	Cambio % precio ponderado	Cambio % venta total	Cambio % ganancia total
OLS	0.67	82	75.72
Lasso	-1.6	127.47	113.15
RLS	1.39	84.91	83.96
DML	2.88	24.12	31.69

Aunque el modelo de optimización Lasso es el que alcanza mayor aumento en ventas y ganancias totales, disminuyendo el precio ponderado de la categoría, su alto MAPE al realizar *cross validation* indica que su estimación de ganancia óptima es poco confiable pudiendo estar sobreestimando la demanda. Por otro lado, DML presenta el menor MAPE, es decir, tiene mayor precisión para predecir. Aunque obtiene menor cambio porcentual en venta y ganancia, se considera más realista que los demás modelos al reducir el sesgo optimista.

Al considerar DML como verdad fundamental, se observa que los precios óptimos estimados con OLS, Lasso y RLS logran una ganancia menor que DML, por lo que, en realidad corresponden a respuestas subóptimas. Esto implica que el uso de estos modelos para estimar elasticidades causaría un costo de oportunidad del 25.77%, 5.14% y 7.53% de la ganancia respectivamente, al alcanzar ganancias inferiores a lo que potencialmente se lograría con los precios óptimos. El menor costo de oportunidad de RLS respecto a OLS sugiere que mitigar el impacto de outliers puede mejorar la captura de la relación entre precio y demanda.

Los experimentos en curso permitirán identificar qué modelo estima mejor la reacción real de los consumidores, reduciendo así la incertidumbre de implementar estrategias de precios basadas en elasticidades estimadas.

Como trabajo futuro, se propone utilizar modelos causales más complejos como *causal forest*, para ver y comparar su desempeño en la estimación de elasticidades. que podría capturar relaciones no lineales mejorando la calidad de las estimaciones.

References

[1] Sarkar, B., Seok, H., Jana, T. K., Dey, B. K. (2023). Is the system reliability profitable for retailing and consumer service of a dynamical system under cross-price elasticity of demand? Journal of Retailing and Consumer Services, 75. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2023.103439

[2] Facure, M. (2023, julio). Causal inference in python: Applying causal inference in the tech industry (First). O'Reilly Media, Inc

[3] Ellickson, P. B., Misra, S. (2008). Supermarket pricing strategies. Marketing Science, 27. https://doi.org/10.1287/mksc.1080.0398

[4] Bray, R., Sanders, R. E., Stamatopoulos, I. (2024, julio). Observational price variation in scanner data cannot reproduce experimental price elasticities [Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4899765].

[5] Ito, S., Yabe, A., Fujimaki, R. (2018). Unbiased objective estimation in predictive optimization. 35th International Conference on Machine Learning, ICML 2018, 5.

[6] Yu, C., Yao, W. (2017). Robust linear regression: A review and comparison. Communications in Statistics - Simulation and Computation, 46(8), 6261–6282. https://doi.org/10.1080/03610918.2016.1202271

[7] Chernozhukov, V., Chetverikov, D., Demirer, M., Duflo, E., Hansen, C., Newey, W., Robins, J. (2018). Double/debiased machine learning for treatment and structural parameters. Econometrics Journal, 21. https://doi.org/10.1111/ectj.12097

Optimización de Ingresos en la Economía Compartida: Políticas de Precios Dinámicos - Un Estudio de Caso de Airbnb

1st Paloma Galaz
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
pgalaz@alumnos.uai.cl

2nd Verónica Díaz
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
veronica.diaz.g@uai.cl

3rd Dana Pizarro
Business School
Toulouse Business School
Toulouse, Francia
d.pizarro@tbs-education.fr

DYNAMIC PRICING OPTIMIZATION IN THE SHARING ECONOMY: A CASE STUDY OF AIRBNB

The rapid growth of the sharing economy has transformed the tourism accommodation sector, with Airbnb emerging as one of its leading platforms. This research analyzes the implementation of dynamic pricing strategies by Airbnb hosts and their impact on revenue optimization and occupancy rates. Using real data from Santiago, Chile, between 2019 and 2024 obtained from Inside Airbnb, the study evaluates how hosts can adapt their prices according to demand, property characteristics, host reputation, and market conditions. The proposed model incorporates a dynamic pricing optimization framework that considers both internal and external determinants to identify revenue-maximizing prices at different booking anticipation horizons. Empirical results highlight significant inefficiencies in current pricing practices, where many hosts fail to capture their full income potential due to static or suboptimal pricing behaviors. By integrating econometric modeling with demand estimation through reservation matrices, this work provides actionable insights for hosts aiming to align their perceived value with guests' willingness to pay. The findings contribute to the growing literature on revenue management in peer-to-peer platforms and demonstrate how data-driven pricing policies can enhance profitability and competitiveness in the sharing economy.

The good, the bad, and the ugly: police space-based disruptions to thwart transactions in retail illicit drug markets

Sebastián Dávila-Gálvez
Department of Industrial Engineering
Universidad de Santiago de Chile
sebastian.davila@usach.cl

Pablo Escalona
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Avenida España 1680, Valparaíso, Chile
pablo.escalona@usm.cl

Luce Brotcorne
Centre Inria de l'Université
de Lille, France
luce.brotcorne@inria.fr

***Abstract*—This paper addresses the operational implementation of a police space-based disruption strategy in an urban neighborhood controlled by a drug gang, where consumers and dealers carry out illicit transactions at the most convenient site. The space-based disruption strategy defines the frequency with which the police authority should intervene at the sites where illicit drugs are bought and sold in order to thwart as many transactions as possible. The interaction between police authority, drug gang, and consumers is modeled as a trilevel Stackelberg game, where the decision of dealers and consumers depends on the risk of the transaction being thwarted by the police authority.**

***Index Terms*—trilevel, cutting plane, unpredictable disruption**

I. Introduction

Urban retail drug markets, dominated by organized gangs, are a persistent threat to community safety and cohesion. These markets flourish in areas with weak institutional presence, where gang influence extends through violence, extortion, and control over public spaces [1], [2]. Traditional enforcement tactics often fail to achieve sustained deterrence due to the adaptability of criminal networks.

An emerging operational approach is space-based disruption, where law enforcement increases the perceived risk of transaction disruption through presence in specific locations. However, criminals often adjust their operations in response to predictable policing patterns. Therefore, we propose an optimization framework that integrates strategic police planning with adversarial behavior modeling.

We develop a trilevel Stackelberg game to capture the sequential decision-making among police, drug gangs, and consumers. The model determines an optimal spatial distribution of disruption probabilities and generates a randomized, unpredictable deployment schedule. Our contributions include a bilevel reduction, a cutting-plane algorithm for scalable solution, and a column-generation method for deriving feasible deployment strategies.

II. trilevel Model

We model the interaction between police authority, drug gangs, and drug consumers as a trilevel Stackelberg game. Let I be the set of disjoint residential blocks, where h_i denotes the number of drug consumers in block i. Let J be the set of potential drug dealing sites, and let n and m denote the number of drug dealers and police teams, respectively. In addition, let $X_j \in \{0,1\}$ indicate whether site j a drug dealer is allocated.

Each consumer located in block i may purchase drugs at any site $j \in N_i := \{j \in J : d_{ij} \leq S_i\}$, where d_{ij} is the travel distance and S_i is a radius of accessibility. We then define the decision variable $W_{ij} \in \{0,1\}$ which takes the value 1 if the consumer in i buys at j, and 0 otherwise. The police authority seeks to disrupt illegal transactions by deploying teams across J with a probabilistic spatial strategy $\{P_j\}_{j\in J}$, where $P_j \in [0,1]$ represents the frequency of disruption at site j. We propose a trilevel Stackelberg game to model the decisions of the players as described below.

The problem of the drug consumer: The consumers are risk-averse and select the purchase site that minimizes their expected risk of disruption. Each consumer from block i chooses one site in $N_i \cup \{0\}$, where 0 represents abstention.

$$\text{CDP}_i(P,X): \quad \arg\min_{W_i} \sum_{j\in N_i^0} P_j W_{ij} \tag{1a}$$

$$\text{s.t.} \sum_{j\in N_i^0} W_{ij} = 1 \tag{1b}$$

$$W_{ij} \leq X_j \quad \forall j \in N_i \tag{1c}$$

$$W_{ij} \in \{0,1\} \tag{1d}$$

Note that the drug consumer that minimizes perceived risk, i.e., $j^* = \arg\min_{j\in N_i: X_j=1} \{P_j\}$. Consequently, let P and X be the feasible solutions for the authority police and the drug gang problems, respectively. The optimal solution $\text{CDP}_i(P,X)$ for

a drug consumer in block i can be expressed as:

$$\left\{ W_i \in \{0,1\}^{|N_i^0|} : W_{ij} \le X^j \ \forall j \in N_i,\ \sum_{j \in N_i^0} W_{ij} = 1, \right.$$
$$\left. P_j X_l \le P_l X_l + (1 - W_{ij}),\ \forall\, j, l \in N_i,\ j \ne l \right\}.$$

The problem of the drug gang: The drug gang allocates up to n dealers to maximize expected demand while accounting for the disruption risk perceived by consumers.

$$\text{DGP}(P, W): \quad \arg\max_{X} \sum_{i \in I} h_i \sum_{j \in N_i} W_{ij}(1 - P_j) \tag{2a}$$
$$\text{s.t.} \sum_{j \in J} X_j \le n, \quad X_j \in \{0,1\}, \tag{2b}$$
$$W_i = CDP_i(P, X) \quad \forall i \in I. \tag{2c}$$

The problem of police authority: The police authority selects the disruption probabilities across J to minimize the expected profit of the gang, subject to the budget of m disruption teams:

$$\text{PS2L:} \quad \min_{P} \quad \sum_{i \in I} h_i \sum_{j \in N_i} W_{ij}(1 - P_j) \tag{3a}$$
$$\text{s.t.} \sum_{j \in J} P_j \le m, \quad P_j \in [0,1], \tag{3b}$$
$$(X, W) = DGP(P, W). \tag{3c}$$

III. Solution Methodology

A. Cutting-Plane Algorithm for PS1L

To solve the PS2L bilevel model, we reformulate it as a single-level semi-infinite linear program (PS1L), where the leader's decision variables are optimized over the convex hull of all follower responses. Let $\mathcal{P}$ denote the feasible set of disruption probabilities, and let $(X^{(k)}, W^{(k)})$ be an optimal response to a fixed disruption strategy $\boldsymbol{P}^{(k)}$. Then, PS2L becomes:

$$\min_{\boldsymbol{P} \in \mathcal{P}} \max_{k \in \mathcal{K}} \left\{ \sum_{i \in I} h_i \sum_{j \in N_i} W_{ij}^{(k)}(1 - P_j) \right\},$$

where $\mathcal{K}$ indexes gang-consumer best responses. The function $g(\boldsymbol{P}) := \max_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in I} h_i \sum_{j \in N_i} W_{ij}^{(k)}(1 - P_j)$ is convex as a pointwise maximum of affine functions. Introducing a scalar θ, we write the equivalent single-level model:

$$\text{PS1L:} \min_{\boldsymbol{P}, \theta} \quad \theta \tag{4}$$
$$\text{s.t.} \sum_{i \in I} h_i \sum_{j \in N_i} W_{ij}^{(k)}(1 - P_j) \le \theta \quad \forall k \in \mathcal{K}, \tag{5}$$
$$\sum_{j \in J} P_j \le m, \quad P_j \in [0,1] \quad \forall j \in J. \tag{6}$$

To solve this semi-infinite program, we adopt a cutting-plane algorithm that iteratively solves. The relaxed master problem (RMP), defined by a finite subset $\mathcal{K} = \{0, 1, ..., k-1\}$ of cuts. The pseudocode is given in Algorithm 1.

Algorithm 1 CP Algorithm for PS1L

```
k = 0
Set P^(0) = 0
(X^(0), W^(0)), Z_DGP^(0) ← solve DGP(P^(0))
Set inf UB = UB^(0) = Z_DGP^(0)
Set LB^(0) = −∞
while (inf UB − LB^(k)) / inf UB > ε do
    k = k + 1
    P^(k), Z_RMP^(k) ← solve RMP
    Set LB^(k) = Z_RMP^(k)
    (X^(k), W^(k)), Z_DGP^(k) ← solve DGP(P^(k))
    Set UB^(k) = Z_DGP^(k)
    if inf UB > UB^(k) then
        inf UB = UB^(k)
    end if
end while
Return optimal disruption strategy {P_j}_{j∈J}
```

B. Unpredictable Schedule via Column Generation

We derive the implementation schedule via a column-generation scheme. Let S be the set of feasible disruption schedules s (each selects m sites). Solve:

$$\min_{\pi, e} \sum_{j \in J} e_j \tag{7}$$
$$\text{s.t.} \sum_{s \in S} \pi_s Y_{j|s} + e_j = P_j, \quad \sum_{s \in S} \pi_s = 1, \quad \pi_s, e_j \ge 0 \tag{8}$$

The pricing problem adds a new schedule minimizing reduced cost $\sum_j \beta_j Y_{j|s} + \theta$.

IV. Results and Insights

We evaluate the performance of the proposed trilevel Stackelberg framework on a series of synthetic instances with $|I| = |J| = 150$ blocks and candidate sites. Across 30 randomly generated problem sets, we vary the number of police teams $m = \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$, drug dealers $n = \{5, 10, 15, 20, 25, 30\}$, and consumer reach radii $d_{\max} = \{1.25, 1.50, 1.75\}$.

The results of the disruption strategies generated via the cutting-plane method (for PS1L) and column generation (for USS(P)) are shown in terms of computational efficiency and rate of territorial disruption capture, in the Table 1 and Table 2, respectively. The main results can be summarized as follows:

- The proposed strategy achieves up to a 50% reduction in territorial capture (RTC) compared to scenarios without enforcement, with consistent performance across a range of police resource levels.
- All instances of PS1L and USS(P) are solved optimally within 1,924s and 3,830s respectively, even for dense configurations ($n = 30$, $d_{\max} = 1.75$).
- While more police teams (m) increase intervention coverage, the marginal benefit diminishes as the number of drug dealers (n) grows.

- Only 25 out of 74 generated disruption schedules account for 80% of surveillance frequency, suggesting high implementability and operational efficiency.
- Broader consumer access ($d_{\max}$) increases the complexity of containment, requiring proportionally more resources to achieve similar RTC levels.

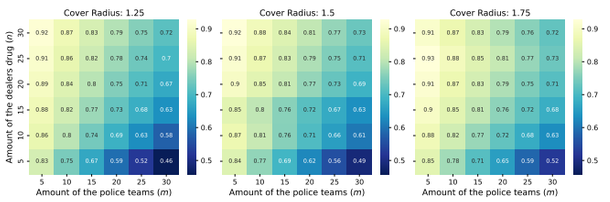


Fig. 1. Heatmap of average rate territorial capture (RTC) as a function of police teams m and drug dealers n for different buy radii $d_{\max}$.

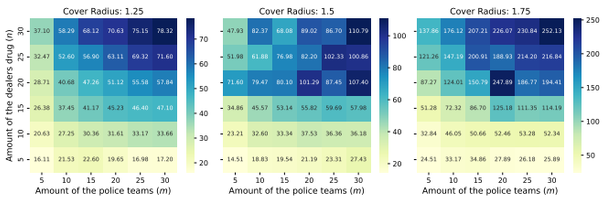


Fig. 2. Average CPU time (in seconds) to solve the PS1L model across varying police team levels m and dealer configurations n for different consumer access radii $d_{\max}$.

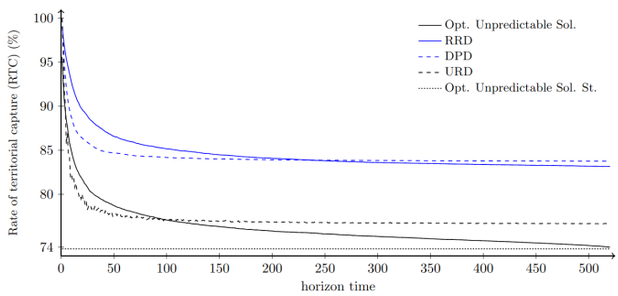


Fig. 3. Comparison of RTC over time under different disruption strategies (URD, RRD, DPD) vs. the optimal unpredictable strategy. Simulated over a 520-day horizon with $m = 30$ police teams and $n = 30$ drug dealers.

To evaluate the practical effectiveness of the proposed strategy, we compare the optimal unpredictable disruption policy against three heuristic alternatives: Uniform Random Disruption (URD)[1], Reactive Random Disruption (RRD)[2], and Demand-Prioritized Disruption (DPD)[3]. Simulation results over a 520-day horizon (with $m = 30$ police teams and $n = 30$ drug dealers) show that the proposed strategy converges to a steady-state reduction in RTC faster than all baselines, stabilizing at approximately 74% RTC. While URD initially performs better, its long-term effectiveness is lower than the optimized strategy.

Among the heuristic policies, RRD and DPD both achieve similar long-term performance (∼85% RTC), but require more time to converge. The proposed approach, by contrast, balances long-term impact with faster convergence. Analysis of the disruption schedule set $\mathcal{D}$ reveals that only 25 out of 74 patrol patterns account for 80% of surveillance frequency, highlighting the operational implementability and concentration of the mixed strategy. On average, each schedule covers about 33% of the territory, suggesting that efficient, targeted patrols are sufficient to destabilize gang operations.

[1]Police randomly select m sites from the full set J each period.

[2]Police target the m sites used by the gang in the previous period.If $m > n$, the rest are allocated randomly.

[3]Police intervene at the m sites with the highest past demand. When $m > n$, the remaining teams are randomly assigned.

V. Conclusion

This study presents a trilevel Stackelberg framework for designing space-based police disruption strategies aimed at weakening street-level drug markets. By modeling the hierarchical decision-making of police authorities, drug gangs, and consumers, which enforcement alters consumer behavior through probabilistic risk, indirectly constraining dealer activity and gang control. The model is reformulated into a semi-infinite linear program (PS1L), which we solve using a cutting-plane algorithm, followed by a column-generation approach to construct randomized, implementable patrol schedules.

Computational experiments on synthetic urban instances demonstrate the effectiveness and scalability of the approach. All test cases are solved to optimality within reasonable CPU time, and the derived strategies achieve substantial reductions in gang territorial control—up to 50%—while outperforming heuristic enforcement baselines. The results show that strategic unpredictability in patrol deployment can significantly disrupt the equilibrium behavior of illicit markets, offering a valuable tool for law enforcement.

Future work includes incorporating uncertainty in demand and agent behavior through robust or stochastic extensions, relaxing full rationality assumptions with bounded decision models, and exploring hybrid interdiction strategies that combine deterrence with targeted enforcement.

Acknowledgment

Pablo Escalona and Sebastian Dávila-Gálvez are grateful for the support of the National Agency for Research and Development (ANID) Chile through grant FONDECYT 1250126 and FONDECYT 11251766, respectively.

References

[1] Contreras, C. and Hipp, J. (2020). Drugs, crime, space, and time. Justice Quarterly.

[2] Gerell, M. et al. (2021). Open drug markets and gun violence. Journal of Policing.

[3] Dandurand, Y. (2021). Law enforcement strategies to disrupt illicit drug markets.

[4] Malaviya, A. et al. (2012). Multi-period network interdiction. IIE Transactions.

[5] Cánovas, L. et al. (2007). Strengthened formulation for plant location problem. OR Letters.

Optimización Cuántica Variacional de la Planificación Minera con Restricciones de Precedencia y Capacidad: Aplicación del Algoritmo VQE

Meylin Leonario-Marambio
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
meylin.leonario@alumnos.ucn.cl

Aldo Quelopana
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
aldo.quelopana@ucn.cl

***Abstract*— La optimización de planes mineros es un problema combinatorio de tipo NP-hard con alta relevancia práctica, que consiste en decidir qué bloques extraer de un yacimiento para maximizar el valor económico total, respetando restricciones de precedencia espacial y limitaciones de capacidad de la mina. Frente a las limitaciones de la computación clásica para abordar este tipo de problemas, este trabajo propone una reformulación del modelo como un problema de *Quadratic Unconstrained Binary Optimization* (QUBO), con el fin de ser resuelto mediante el algoritmo *Variational Quantum Eigensolver* (VQE). Si bien los resultados se limitan a instancias de pequeña escala, estos entregan evidencia preliminar de la efectividad del enfoque y su potencial para ser explorado en mayor profundidad en investigaciones futuras.**

Palabras claves — optimización cuántica, VQE, QUBO, planificación minera.

I. INTRODUCCIÓN

La planificación minera estratégica constituye uno de los pilares fundamentales para maximizar el beneficio de los proyectos mineros, determinando la secuencia óptima de extracción de bloques a lo largo de la vida útil de la mina [1]. La importancia económica de una buena planificación es sustancial, ya que mejoras en la eficiencia de extracción pueden traducirse en incrementos del valor actual neto del proyecto del orden del 10% al 25%, según documenta la literatura especializada [2][3].

En la minería a cielo abierto, esta planificación se traduce en decisiones críticas sobre qué bloques extraer, considerando restricciones geométricas de precedencia y limitaciones operativas de capacidad de la mina [4][5]. La naturaleza combinatoria del problema genera espacios de solución que crecen exponencialmente con el número de bloques. Por ejemplo, en el peor caso un modelo de n bloques y variables binarias (1 = extraer, 0 = no extraer) implica 2^n configuraciones posibles, incluso antes de considerar restricciones adicionales como la incertidumbre geológica [6]. Esta situación es propia de problemas NP-hard.

Estas características restringen la aplicabilidad de métodos exactos, motivando la exploración de enfoques alternativos capaces de abordar instancias de mayor escala y complejidad [7][8]. La práctica actual recurre ampliamente a metaheurísticas como *Particle Swarm Optimization* [9], *Simulated Annealing* [10], *Tabu Search* [11] y *Variable Neighborhood Descent* [12]. Estas técnicas permiten obtener soluciones razonables en tiempos aceptables, pero dependen fuertemente de la solución inicial desde la cual se parte y carecen de garantías de optimalidad global [13]. Estas limitaciones evidencian la necesidad de explorar nuevos enfoques capaces de manejar la complejidad estructural del problema.

En este contexto, la computación cuántica emerge como una tecnología prometedora, al aprovechar principios de la mecánica cuántica como superposición y entrelazamiento para explorar el espacio de soluciones [14]. Pese a que se encuentra en una etapa de maduración, se busca avanzar en el desarrollo de algoritmos que permitan estar preparados para la llegada de hardware cuántico más robusto [15].

Esta investigación forma parte de una línea preliminar y exploratoria, orientada a verificar la viabilidad de aplicar el algoritmo VQE en un problema de planificación con restricciones adicionales a las de precedencia, extendiendo así investigaciones como [16-17] y estableciendo una base para futuros estudios con mayor alcance.

II. METODOLOGÍA

A. Formulación clásica del problema

La selección de bloques que se abordará en el presente estudio, se formula como un problema de programación entera binaria.

Sean:

- n: número total de bloques
- v_i: valor económico neto del bloque i
- P_i: conjunto de bloques predecesores del bloque i
- x_i: variable binaria de decisión (xi = 1 si el bloque i es extraído, 0 en caso contrario)
- C: capacidad máxima de bloques a extraer

La formulación clásica busca:

$$\max Z = \sum_{i=1}^{n} v_i x_i \quad (1)$$

Sujeto a:

- Restricciones de precedencia:
$$x_i \leq x_j, \qquad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in P_i \quad (2)$$

- Restricción de capacidad:
$$\sum_{i=1}^{n} x_i \leq C \quad (3)$$

- Restricciones binarias:
$$x_i \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

Esta formulación garantiza que un bloque solo puede ser extraído si todos sus bloques predecesores han sido previamente minados, mientras se respeta la capacidad operativa y se maximiza el valor económico total.

A. *Reformulación QUBO*

Para aplicar algoritmos cuánticos variacionales, el problema debe reformularse como uno de minimización en el marco de un modelo QUBO [18]. Esta reformulación se logra mediante la incorporación de términos de penalización que representan las restricciones, integrándolas en la función objetivo. Como resultado, la función queda compuesta por tres términos:

$$\min f(x) = -\sum_{i=1}^{n} v_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \sum_{j \in P_i} (1 - x_j) x_i + \beta \left(\sum_{i=1}^{n} x_i - C\right)^2 \quad (5)$$

donde:

- El primer término es negativo con el fin de adaptar la función objetivo original a un problema de minimización.
- El segundo término introduce una penalización cuando se extrae el bloque i sin haber extraído previamente su predecesor j, incorporando así las restricciones de precedencia.
- El tercer término se modifica respecto de la formulación original, con el propósito de aproximar la solución a la capacidad operativa *C*. Esta modificación es posible, ya que la nueva formulación no genera soluciones infactibles.

III. ALGORITMO VQE

El algoritmo VQE es un enfoque híbrido cuántico-clásico diseñado para encontrar el estado base de un Hamiltoniano que representa la energía del sistema y que encapsula el problema de optimización. Su funcionamiento se basa en parametrizar un circuito cuántico (ansatz) que genera un estado candidato $|\psi(\vec{\theta})\rangle$. Este estado se evalúa a través de medidas de expectativa de energía, y un optimizador clásico ajusta iterativamente los parámetros del circuito con el objetivo de minimizar dicha energía. Este enfoque permite incorporar restricciones en la formulación del Hamiltoniano y aprovechar la mecánica cuántica para explorar configuraciones de manera paralela, lo que lo convierte en una alternativa prometedora frente a métodos clásicos [19] [20][21].

El Hamiltoniano es construido a partir de la formulación QUBO, utilizando la siguiente correspondencia:

$$x_i = \frac{1 - z_i}{2} \quad (6)$$

Donde z_i es el operador de Pauli-Z aplicado al qubit i.

Esta conversión permite representar cada término cuadrático binario del QUBO como una combinación lineal de operadores z y productos $z_i z_j$, formando así un Hamiltoniano que puede ser interpretado físicamente como un sistema de espines.

En este trabajo, el ansatz utilizado se construyó mediante compuertas de rotación R_y aplicadas individualmente a cada qubit, junto con compuertas de entrelazamiento CNOT basadas en las relaciones de precedencia entre bloques (Fig. 1). La elección de este diseño busca reflejar la estructura del problema y facilitar la exploración eficiente del espacio de soluciones.

Para la optimización de los parámetros del circuito, se empleó el algoritmo COBYLA como optimizador clásico, mientras que las expectativas de energía se estimaron utilizando un simulador cuántico.

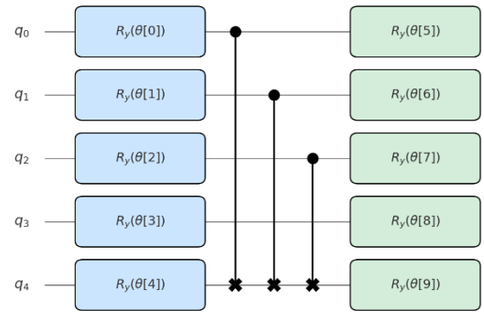


Fig. 1. Ejemplo de una capa del ansatz utilizado para abordar el problema de optimización.

IV. RESULTADOS PRELIMINARES

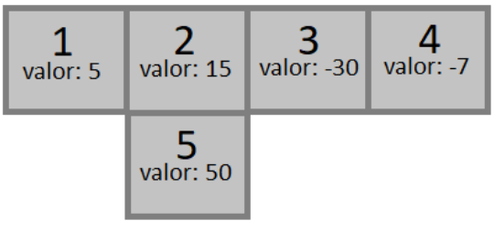


Fig. 2. Identificación y valores de los bloques que componen la instancia del problema.

El algoritmo VQE fue implementado utilizando la librería Qiskit de IBM aplicado a una instancia de 5 bloques con valores económicos variables y una relación de precedencia que requiere la extracción de los bloques 1, 2 y 3 antes que el bloque 5 (Fig 2).

Se probaron distintas capacidades máximas (*C*) variando desde 1 hasta 5 bloques. Las restricciones se penalizaron mediante los parámetros λ_4 y β, los cuales fueron calibrados a partir de los precios sombra obtenidos del problema dual. Esta estrategia permitió guiar la formulación cuántica hacia soluciones factibles y reducir la arbitrariedad en la selección de penalizaciones. Por ejemplo, para $C = 1$, $\lambda_4 = 25$ y $\beta = 15$, mientras que para $C = 5$ se fijaron en $\lambda_4 = 30$ y $\beta = 0$.

Para el ansatz se emplearon entre 4 y 5 capas de compuertas R_y con entrelazamiento basado en las precedencias, tal como se explicó anteriormente (Fig. 1). El entrenamiento de los parámetros se realizó utilizando COBYLA con un máximo de 300 iteraciones.

Se ejecutaron 4906 *shots* en el simulador, obteniéndose soluciones óptimas sin violar las restricciones. No obstante, las probabilidades de alcanzar dichos resultados fueron mayores en los casos en que el valor de C coincidía exactamente con el número de bloques que conformaban la solución óptima: $C = 1$ (bloque 1, valor total 15), $C = 2$ (bloques 1 y 2, valor total 20) y $C = 4$ (bloques 1, 2, 3 y 5, valor total 40), donde superaron el 80%. En contraste, para $C = 3$ (bloques 1 y 2, valor total 20) y $C = 5$ (bloques 1, 2, 3 y 5, valor total 40), las probabilidades se mantuvieron por debajo del 20%. Estos resultados fueron validados posteriormente utilizando el solver Gurobi.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo demuestra la viabilidad de aplicar VQE a problemas de optimización combinatoria en minería, evidenciando su capacidad para encontrar soluciones óptimas bajo restricciones y reforzando, de esta manera, su aplicación en la planificación minera.

La formulación QUBO, el Hamiltoniano y ansatz propuestos representan una base metodológica aplicable a otros problemas de optimización con restricciones. Pese a los desafíos de escalabilidad señalados en la literatura, los resultados obtenidos corroboran el potencial de los algoritmos cuánticos variacionales como complemento a los enfoques clásicos de optimización.

La convergencia hacia la solución óptima global sugiere que este enfoque podría ofrecer ventajas computacionales a medida que la tecnología cuántica madure y se disponga de dispositivos con un mayor número de qubits. No obstante, para incrementar las probabilidades de encontrar el óptimo en aquellos casos en que la capacidad C no coincida con el número de bloques que conforman la solución óptima, resulta necesario explorar ajustes en la formulación, incorporando, por ejemplo, variables de holgura en el tercer término de la Ecuación 5.

Como líneas adicionales de investigación, se propone aumentar la cantidad de bloques considerados e incorporar nuevas restricciones operativas, como las de tipo multiperíodo, con el fin de aproximar el modelo a escenarios más realistas y, al mismo tiempo, poner a prueba los límites actuales del algoritmo.

REFERENCES

[1] P. A. Á. Fuentes. “Metodología de gestión de información en el proceso de planificación minera de Codelco.” Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile, Feb. 2018, profesor guía: Nelson Gonzalo Ruminó Espiinoza; Miembros de la comisión: Jaime Henríquez Molina, Javier Cornejo González.

[2] K. Dagdelen and T. B. Johnson, “Optimum open pit mine production scheduling by lagrangian parameterization,” in Proceedings of the 19th Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM). Society of Mining Engineers of AIME, 1986, pp. 127–142.

[3] D. Bienstock and M. Zuckerberg, “Solving lp relaxations of large-scale precedence constrained problems,” in Integer Programming and Combinatorial Optimization, F. Eisenbrand and F. B. Shepherd, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 1–14.

[4] A. M. Newman, E. Rubio, R. Caro, Á. Weintraub y K. Eurek, “A Review of Operations Research in Mine Planning,” *Interfaces*, vol. 40, no. 3, pp. 222–245, junio de 2010, doi: 10.1287/inte.1090.0492

[5] P. Darling, Ed., SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed. Englewood, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011.

[6] T. Lagos, M. Armstrong, T. Homem-de-Mello, G. Lagos, y D. Sauré, “A framework for adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty,” *Optimization and Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 111–146, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11081-020-09557-0

[7] S. Ramazan, “Production scheduling with uncertain supply: A new solution to the open pit mining problem,” Optimization and Engineering, vol. 14, 06 2013.

[8] L. Skyttner, General Systems Theory – Ideas & Applications. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001.

[9] A. Khan, “Long-term production scheduling of open pit mines using particle swarm and bat algorithms under grade uncertainty,” *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 118, no. 4, pp. 361–368, Apr. 2018, doi: 10.17159/2411-9717/2018/v118n4a5

[10] Z. Levinson y R. Dimitrakopoulos, “Simultaneous stochastic optimisation of an open-pit gold mining complex with waste management,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 34, no. 6, pp. 415–429, 2019, doi: 10.1080/17480930.2019.1621441

[11] R. Senécal y R. Dimitrakopoulos, “Long-term mine production scheduling with multiple processing destinations under mineral supply uncertainty, based on multi-neighbourhood tabu search,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 34, no. 7, pp. 459–475, 2020, doi: 10.1080/17480930.2019.1595902

[12] A. Quelopana Retamal and A. Navarra, “Incorporating operational modes into long-term open-pit mine planning under geological uncertainty: An optimization combining variable neighborhood descent with linear programming,” Mining, Metallurgy & Exploration, vol. 41, 08 2024.

[13] M. Sarhani, S. Voß y R. Jovanovic, “Initialization of metaheuristics: comprehensive review, critical analysis, and research directions,” *International Transactions in Operational Research*, 13 de diciembre de 2022, doi: 10.1111/itor.13237

[14] G. Benenti, G. Casati, D. Rossini, and G. Strini, *Principles of Quantum Computation and Information*. Singapore: World Scientific, 2018, doi: 10.1142/10909.

[15] F. Albarrán, P. Assmann, A. Delgado, D. Goyeneche, C. H. Avigliano, S. Torres, C. Torres, and S. Walborn, *Recomendaciones y desafíos para el fortalecimiento del ecosistema cuántico en Chile*, no. 1. Comisión Asesora de Tecnologías Cuánticas, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, Chile, Sep. 5, 2024.

[16] Y. Hindy, J. Pointing, M. Tolunay, S. Venkatarao, M. Motta, and J. A. Latone, A quantum computational approach to the open-pit mining problem, arXiv preprint arXiv:2107.11345, 2021. [En línea]. Disponible en: https://arxiv.org/abs/2107.11345

[17] G. Paradezhenko, A. Pervishko, and D. Yudin, “Quantum-assisted open-pit optimization,” JETP Lett., vol. 119, no. 6, pp. 470–478, 2024, doi: 10.1134/S0021364023604256.

[18] F. Glover, G. Kochenberger, R. Hennig y Y. Du, “Quantum bridge analytics I: a tutorial on formulating and using QUBO models,” *Annals of Operations Research*, vol. 314, no. 1, pp. 141–183, jul. 2022, doi: 10.1007/s10479-022-04634-2

[19] J. Tilly, H. Chen, S. Cao, D. Picozzi, K. Setia, Y. Li, E. Grant, L. Wossnig, I. Rungger, G. H. Booth y J. Tennyson, “The Variational Quantum Eigensolver: a review of methods and best practices,” *Physics Reports*, vol. 986, pp. 1–128, 2022, doi: 10.1016/j.physrep.2022.01.001

[20] A. Peruzzo, J. McClean, P. Shadbolt, M.-H. Yung y X.-Q. Zhou, “A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor,” *Nature Communications*, vol. 5, art. 4213, 2014, doi: 10.1038/ncomms5213

[21] J. R. McClean, J. Romero, R. Babbush y A. Aspuru-Guzik, “The theory of variational hybrid quantum-classical algorithms,” *New Journal of Physics*, vol. 18, no. 2, feb. 2016, doi: 10.1088/1367-2630/18/2/023023

Session N°8 – Track N°1

Public Transportation

Chair: Basso, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
Place: G6-054
Time: 15:30 – 16:45

Modelo de Protección e Interdicción de un Corredor de Transporte Público: Un Caso de Estudio en Concepción

Time: 15:30 – 15:45
Authors:

- Salazar-Gómez, R. *(Universidad Andrés Bello)*
- Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*

Managing Incivilities in Santiago's Public Transportation System Through Stackelberg Games

Time: 15:50 – 16:05
Authors:

- Escalona, P. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Cerda, D. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Alcota, M. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Angulo, A. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*

Modelo de Programación Entera Mixta para la Planificación Integrada de Vehículos y Turnos de Conductores en Flotas Híbridas

Time: 16:10 – 16:25
Authors:

- Berríos-Soto, K. *(Universidad de Chile)*
- Cortés-Carrillo, C. *(Universidad de Chile)*
- Rey, P. *(Universidad Tecnológica Metropolitana)*

Integración de Datos de Telefonía Celular y Smart Card para la Estimación Granular de Evasión Tarifaría en Sistemas de Transporte Urbano

Time: 16:30 – 16:45
Authors:

- Quilodrán-Torres, P. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Basso, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Pezoa, R. *(Universidad Diego Portales)*
- Varas, M. *(Universidad del Desarrollo)*

Modelo de protección e interdicción de un corredor de transporte público: Un caso de estudio en Concepción

1st Rodrigo Salazar-Gómez
Ingeniería Civil Industrial
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
r.salazargmez@uandresbello.edu

2nd Armin Lüer-Villagra
Departamento de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Talcahuano, Chile
armin.luer@unab.cl

***Resumen*—Este trabajo busca formular y resolver un problema de protección e interdicción de nodos de un corredor de transporte público, con un presupuesto limitado de protección. El gestor de la red busca minimizar el tiempo total de tránsito por el corredor, mientras que un atacante busca maximizarlo, buscando inhabilitar total o parcialmente r nodos del corredor, en función de la protección realizada. Actualmente se está terminando de formular el modelo matemático y comenzando a implementar la metodología de resolución. Se espera contar con un caso de estudio de la ciudad de Concepción, así como pruebas computacionales de desempeño.**

***Index Terms*—corredores de buses de transporte público, BRT, interdicción, protección, binivel**

I. Introducción

El transporte es un motor estratégico para el desarrollo económico y la equidad social. Según la OCDE, satisfacer la demanda global de infraestructura de transporte requerirá invertir el 1,7 % del PIB mundial anual hasta 2050 [1].

El transporte puede ser dividido en transporte de carga y de pasajeros. En el caso del transporte de personas, existen dos tipos principales: el transporte privado y el transporte público.

El transporte público puede llevarse a cabo mediante múltiples modos de transporte, entre las más comunes se encuentran: ferry, metro, tren y buses. Es común en ciudades medianas a grandes se presentan dinámicas de cooperación y competencia en distintos modos de transporte.

Una solución interesante para mitigar los efectos de la congestión es el uso de infraestructura dedicada para el transporte público en la ciudad [2].

Los corredores para buses son un sistema integrado de alta capacidad y bajo costo que, a su vez, mejora la velocidad, confiabilidad y flexibilidad del transporte en autobús. [3] Estos corredores consisten en vías exclusivas o carriles segregados diseñados específicamente para buses, permitiéndoles operar sin interferencias del tráfico general.

En este ámbito, los corredores o sistemas BRT (Bus Rapid Transit) han cobrado especial relevancia en América Latina, región pionera en su implementación con más de 45 ciudades invirtiendo en ellos. Estos sistemas frecuentemente se integran con estrategias de desarrollo urbano, como en Curitiba, Brasil, donde los BRT han guiado el crecimiento ordenado y fortalecido el transporte público. [4]

Su implementación no solo reduce los tiempos de viaje y aumenta la previsibilidad de los servicios, sino que también contribuye a disminuir las emisiones de CO2 al evitar la congestión. La protección de esta infraestructura dedicada es vital para sistemas de cadena de suministros y servicios, por lo que es razonable invertir en protección para nodos o arcos de esta red. [5]

Una forma posible de estudiar la dinámica de la protección y ataque de estos sistemas es mediante los problemas de protección e interdicción. Estos implican la creación de un modelo que aborde la seguridad y resiliencia de una red usualmente manejada como un grafo, donde se entiende por resiliencia la "habilidad de un sistema para resistir una disrupción y recuperarse rápidamente de ella" [6] que generalmente se busca maximizar en una red.

La interdicción se define como las decisiones de un atacante o interdictor para afectar o dañar un sistema, con el objetivo de reducir la eficiencia de una red. [7] Estas acciones pueden ir dirigidas a nodos o arcos que representan entidades y sus conexiones en las redes. Por otro lado, las decisiones de protección se refieren a aquellas acciones implementadas por un defensor para mitigar los efectos adversos de la interdicción, fortificando nodos o arcos críticos para prevenir ataques o reducir su impacto. [8]

Los problemas de protección e interdicción permiten identificar puntos críticos [9] y priorizar inversiones para prevenir disrupciones [10], diseñando mecanismos que fortalezcan la infraestructura de transporte y otros sistemas esenciales frente a amenazas y contingencias.

Considerando la relevancia de proteger infraestructuras críticas en sistemas interconectados, en la presente investigación se busca analizar la protección e interdicción binaria de paraderos en un corredor de transporte público.

II. El problema

Existe un corredor de transporte público operando. Tanto su estructura como la red vial circundante están representadas

mediante un grafo $G(N, A)$, donde N es el conjunto de nodos y A el conjunto de arcos.

El corredor se compone de un conjunto de nodos $C \subset N$ y arcos $K \subset A$. La demanda de transporte viene dada para pares origen-destino de nodos $OD \subset N \times N$, donde el par $(i, j) \in OD$ tiene una demanda determinística de transporte w_{ij}.

Cada nodo del corredor $k \in C$ es capaz de procesar una cantidad máxima de flujo U_k entrante.

Para cada arco $(k, m) \in A$ se conoce su tiempo de tránsito, denotado T^{km}.

El operador del corredor dispone de un presupuesto Q para proteger el corredor, donde el nodo $k \in C$ del corredor puede protegerse en L_k niveles. Se denota por B_{kl} el costo de proteger el nodo $k \in C$ en el nivel $l \in 1, \ldots, L_k$.

Existe un atacante que es capaz de atacar r nodos del corredor. Si ataca un nodo desprotegido, este no podrá procesar flujo. De proteger un nodo $k \in C$ al nivel $l \in 1, \ldots, L_k$, se garantiza que un S_{kl} % del flujo máximo admisible pueda ser procesado.

La demanda es atendida por vehículos que circulan por el corredor. Si un nodo del corredor no cuenta con suficiente capacidad, debido a su propio diseño o algún ataque, los vehículos (buses) buscarán una ruta que minimice su tiempo de viaje fuera del corredor.

El objetivo del operador es minimizar el tiempo total de viaje de los usuarios del corredor tras el ataque. El atacante busca maximizar dicha cantidad.

III. El modelo

La formulación resultante es un modelo binivel lineal entero mixto.

En el nivel superior está el operador del corredor, que busca minimizar el tiempo total de viaje en el corredor tras el ataque. Se cuenta con restricciones que aseguran la conservación de los flujos, manejan la capacidad disponible tras un eventual ataque en función del nivel de protección escogido y aseguran que se cumpla la limitación presupuestaria de protección.

En el nivel inferior, un atacante busca atacar un máximo de r nodos del corredor, disminuyendo la capacidad para procesar flujo de estos en función del nivel de protección existente. Busca maximizar el tiempo total de viaje en el corredor tras el ataque.

IV. Método de solución

Se espera poder resolver el modelo resultante usando un algoritmo exacto Branch-and-Bound con las modificaciones propuestas por [11], [12]. Se estima que la implementación será en Python 3.10 con la API respectiva de CPLEX 22.1.

V. Trabajo actual y futuro

Actualmente se está trabajando en la implementación del modelo matemático y método de resolución, así como la preparación de instancias, tanto sintéticas como un estudio de caso para la ciudad de Concepción.

Referencias

[1] I. T. Forum, "Itf transport outlook 2023." https://www.itf-oecd.org/node/27625, 2023. Visited 27-06-2025.

[2] A. Russo, M. W. Adler, and J. N. van Ommeren, "Dedicated bus lanes, bus speed and traffic congestion in rome," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 160, pp. 298–310, 6 2022.

[3] N. B. Institute, "Brt basics." https://nbrti.org/learn/, 2025. Visited 27-06-2025.

[4] D. A. Rodríguez and E. V. Tovar, "Sistemas de transporte público masivo tipo brt (bus rapid transit) y desarrollo urbano en américa latina." https://www.lincolninst.edu/es/publications/articles/sistemas-transporte-publico-masivo-tipo-brt-bus-rapid-transit-desarrollo/, 2013. Visited 27-06-2025.

[5] M. Akbari-Jafarabadi, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Mahmoodjanloo, and Y. Rahimi, "A tri-level r -interdiction median model for a facility location problem under imminent attack," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 114, pp. 151–165, 12 2017.

[6] N. Ghorbani-Renani, A. D. González, K. Barker, and N. Morshedlou, "Protection-interdiction-restoration: Tri-level optimization for enhancing interdependent network resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 199, p. 106907, 7 2020.

[7] J. C. Smith and Y. Song, "A survey of network interdiction models and algorithms," *European Journal of Operational Research*, vol. 283, pp. 797–811, 6 2020.

[8] M. C. Roboredo, L. Aizemberg, and A. A. Pessoa, "An exact approach for the r-interdiction covering problem with fortification," *Central European Journal of Operations Research*, vol. 27, pp. 111–131, 3 2019.

[9] D. Aksen, S. Şengül Akca, and N. Aras, "A bilevel partial interdiction problem with capacitated facilities and demand outsourcing," *Computers & Operations Research*, vol. 41, pp. 346–358, 1 2014.

[10] M. P. Scaparra and R. L. Church, "An exact solution approach for the interdiction median problem with fortification," *European Journal of Operational Research*, vol. 189, pp. 76–92, 8 2008.

[11] M. Fischetti, I. Ljubić, M. Monaci, and M. Sinnl, "A new general-purpose algorithm for mixed-integer bilevel linear programs," *Operations Research*, vol. 65, pp. 1615–1637, 2017.

[12] M. Fischetti, I. Ljubić, M. Monaci, and M. Sinnl, "On the use of intersection cuts for bilevel optimization," *Mathematical Programming*, vol. 172, pp. 77–103, 2018.

Managing incivilities in Santiago's public transportation system through Stackelberg games

Pablo Escalona
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
pablo.escalona@usm.cl

Daniel Cerda
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
daniel.cerdac@usm.cl

Mario Alcota
Department of Industrial Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
mario.alcota@usm.cl

Alejandro Angulo
Department of Electrical Engineering
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
alejandro.angulo@usm.cl

***Abstract*—This work addresses the problem of fare evasion in public transportation systems through an optimized urban patrolling approach. The interaction between an enforcement authority and opportunistic users is modeled as a Stackelberg game, where the leader (the authority) aims to minimize losses due to evasion by allocating patrol teams, and the followers (passengers) rationally decide whether to evade or not. To this end, a bilevel model with capacity, coverage, and urban geography constraints is formulated and solved using duality and KKT conditions. Additionally, a partition of the city into contiguous, compact, and balanced districts is proposed to improve the operational efficiency of deployment. The model is applied to real data from the Transantiago system (Santiago, Chile), integrating both the bus stop network structure and spatial and socio-demographic information. Results demonstrate substantial improvements in inspection coverage and expected evasion reduction, highlighting the usefulness of the mathematical-spatial approach in urban planning.**

INTRODUCTION

Fare evasion in public transport is a growing global concern, particularly in proof-of-payment systems where entry is not systematically controlled. In Santiago, Chile, bus fare evasion has fluctuated significantly over recent years: approximately 27% in late 2019, decreasing to around 21% in 2021 under stricter enforcement, but rising again to nearly 30% by 2024 [1]–[3].

In London, the overall fare evasion rate across all Transport for London (TfL) services fell modestly from an estimated 3.9% in 2022/23 to 3.5% in 2024, despite increasing ridership, and fare evasion costs the network about £130 million annually [4].

In New York City, bus fare evasion remains alarmingly high: it rose from around 38% in early 2023 to nearly 50% by mid-2024. Subway evasion reached 13% in late 2023 and dropped slightly to 9.8% in early 2025, while bus evasion remained at approximately 44% [5], [6].

In Santiago, evasion behavior is not uniform: it is more prevalent among younger passengers, during afternoon and evening hours, on buses without barriers, and in low-income districts—indicating both socioeconomic and logistical drivers [7]. Despite multiple countermeasures (e.g. tougher fines and targeted inspections), fare evasion continues to undermine system equity and sustainability.

To tackle this challenge, this work proposes a strategic patrolling model underpinned by a prior urban districting process. We partition the city into districts optimized for contiguity, compactness, and balance in passenger demand and bus volume, facilitating efficient allocation of inspection teams [9].

Based on this partition, we formulate a Stackelberg-type mathematical model. At the upper level (leader), inspection teams are optimally deployed across districts to maximize expected revenue from opportunistic passengers. At the lower level (follower), opportunistic passengers decide whether to pay or evade based on perceived inspection risk along their chosen route [8].

The full model incorporates realistic operational constraints and is implemented in Python and solved using Gurobi, using real-world data from the Transantiago system to evaluate its applicability and effectiveness.

FOLLOWER PROBLEM

This model represents the behavior of opportunistic passengers who decide whether or not to buy tickets based on their perception of inspection probabilities. Honest passengers always pay and thus do not affect the optimization.

Parameters

- $\mathbb{P}_p^i$: Probability that opportunistic passengers of type p are inspected on route $i \in N_p$.
- B: Ticket price.
- F: Fine amount.

Variables

$$W_p^o = \begin{cases} 1, & \text{if opportunistic passengers of type } p \text{ buy a ticket} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H_p^i = \begin{cases} 1, & \text{if opportunistic passengers of type } p \text{ follow route } i \in N_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Compact model FMP(p)

$$\min_{W_p^o, H_p^i} \quad BW_p^o + F(1 - W_p^o) \sum_{i \in N_p} \mathbb{P}_p^i H_p^i \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in N_p} H_p^i = 1 \tag{2}$$

$$W_p^o \in \{0, 1\} \tag{3}$$

$$H_p^i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N_p \tag{4}$$

The objective function of the follower minimizes the expected cost for opportunistic passengers, considering the fare price and the potential fine in case of fare evasion, weighted by the probability of being inspected.

(2) ensures that each opportunistic passenger chooses a single route $i \in N_p$ to reach their destination, reflecting the logic that they cannot split between multiple routes. (3) and (4) impose that the decisions about buying the ticket (W_p^o) and selecting the route (H_p^i) are binary.

From FMP(p), it follows that

$$U_p^o = \min \left\{ B,\, F \min_{i \in N_p} \{\mathbb{P}_p^i\} \right\}.$$

Finally, the equation represents the final decision of the opportunistic passenger, who will always choose between paying the fare or taking the most "advantageous" route to their destination in terms of the lowest risk of inspection. This choice corresponds to either paying the ticket or risking evasion, considering the minimum expected fine along the shortest possible routes.

I. Leader model

This section presents the leader's optimization model where the authority aims to maximize expected revenue from opportunistic passengers only, since honest passengers always pay their fares and their contribution is fixed. The model allocates inspection teams across urban bus districts considering the probabilistic inspection of buses arriving at districts, where the number of buses inspected depends on a Poisson arrival process represented by the random variable r_x.

A. Model formulation

We begin by defining the parameters and decision variables used in the model.

Parameters:

- P: Set of passenger types.
- X: Set of inspection districts.
- N_p: Set of routes available to passenger type $p \in P$.
- χ_p^i: Set of bus line and district pairs (x, l) traversed by passengers of type p on route $i \in N_p$.
- d_p^o: Number of opportunistic passengers of type p.
- $E(d_p^o)$: Expected number of opportunistic passengers of type p.
- B: Fare price paid by passengers.
- F: Fine amount imposed when caught fare evading.
- n: Maximum number of inspection teams available.
- q_{xl}: Number of buses of line l in district x.

Random variables and derived parameters:

- r_x: Random variable denoting the number of buses that an inspection team can control in district x.
- $\omega_{xl}|\gamma_x$: Number of buses inspected on line l in district x given γ_x inspection teams assigned.
- $$f_{xl}^k(r_x) = \sum_{j=1}^{\min\{q_{xl}, k\, r_x\}} P(\omega_{xl} = j \mid \gamma_x = k, r_x = r) \frac{j}{q_{xl}},$$

  representing the conditional probability of inspection on arc (x, l) given k inspection teams and the bus inspection capacity random variable r_x equal to r.

Decision variables:

- P_x^k: Probability that k inspection teams are assigned to district x, for $k = 0, \ldots, n$.
- Y_x: Expected number of inspection teams assigned to district x.
- U_p^o: Expected payment collected from opportunistic passengers of type p.

$$\max_{Y, U, P} \quad \sum_{p \in P} E(d_p^o)\, U_p^o \tag{5}$$

$$\text{s.t. } U_p^o \le B \qquad \forall p \in P \tag{6}$$

$$U_p^o \le F\Big(1 - \prod_{(x,l) \in \chi_p^i} \big(1 - \sum_{k=1}^{n} P_x^k f_{xl}^k(r_x)\big)\Big) \quad \forall i \in N_p, \forall p \in P \tag{7}$$

$$\sum_{k=0}^{n} P_x^k = 1 \qquad \forall x \in X \tag{8}$$

$$Y_x = \sum_{k=0}^{n} k\, P_x^k \qquad \forall x \in X \tag{9}$$

$$\sum_{x \in X} Y_x \le n \tag{10}$$

$$0 \le Y_x \le n \qquad \forall x \in X \tag{11}$$

$$P_x^k \in [0, 1] \qquad \forall x \in X, k = 0, \ldots, n \tag{12}$$

$$U_p^o \ge 0 \qquad \forall p \in P \tag{13}$$

The objective function maximizes the expected revenue from opportunistic passengers, considering their expected payment and population. The constraint on U_p^o limits the expected payment per passenger to the fare price B. The nonlinear constraint expresses the expected payment considering inspection probabilities, which depend on the number of inspection teams assigned and the random variable r_x, modeling the number of buses that can be inspected in each district. Probabilities of inspection team assignments sum to one per district, with Y_x representing the expected number of teams assigned to district x. The total number of inspection teams is limited by n. The bounds enforce valid probability and non-negativity conditions.

Since the nonlinear constraint is difficult to solve, the following linear relaxation is introduced:

$$U_p^o \leq F \sum_{(x,l)\in\chi_p^i} \sum_{k=1}^{n} P_x^k \, f_{xl}^k(r_x) \quad \forall i \in N_p, p \in P. \tag{14}$$

This relaxation simplifies the model while maintaining a realistic approximation of inspection probabilities based on the bus inspection capacity random variable r_x.

Expected Computational Impacts

Although numerical results are not yet available, the proposed Stackelberg-based framework allows us to anticipate the expected computational effects. In particular, the model is designed to determine an optimal deployment of inspection teams across the bus network, assigning them to districts in a manner that maximizes the expected revenue collected from opportunistic passengers. The district-based allocation, with districts already balanced in terms of bus workload, facilitates the systematic evaluation of different inspection team allocations. These expected impacts highlight the model's potential to guide the design of inspection strategies and to evaluate, in a computational scenario, the effectiveness of different assignment schemes, even before concrete numerical results are obtained.

REFERENCES

[1] DTPM, "Índice de evasión en el sistema de transporte público de Santiago – Resultados 2019," Departamento de Transporte Público Metropolitano, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Santiago, Chile, 2019.

[2] DTPM, "Índice de evasión en el sistema de transporte público de Santiago – Resultados 2021," Departamento de Transporte Público Metropolitano, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Santiago, Chile, 2021.

[3] DTPM, "Índice de evasión en el sistema de transporte público de Santiago – Resultados 2024," Departamento de Transporte Público Metropolitano, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Santiago, Chile, 2024.

[4] Transport for London, "Fare dodging cost TfL £130m in 2022–23, fare evasion at 3.5

[5] Metropolitan Transportation Authority (MTA), "MTA bus fare evasion rose to nearly 50

[6] Metropolitan Transportation Authority (MTA), "Subway evasion 13

[7] R. Cantillo, Raveau Muñoz, "Fare evasion in Santiago: socio-demographic patterns," *Transportation Research Part A*, vol. 156, pp. 285–295, 2022.

[8] P. Escalona, L. Brotcorne, B. Fortz M. Ramírez, "Fare inspection patrolling under in-station selective inspection policy," *Annals of Operations Research*, vol. 332, pp. 191–212, 2024.

[9] V. Bucarey, "Shape and Balance in Police Districting," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 168, pp. 122–145, 2022.

Modelo de programación entera mixta para la planificación integrada de vehículos y turnos de conductores en flotas híbridas

Katherine Paola Berríos Soto
Doctorado en Sistemas de Ingeniería
Universidad de Chile
Santiago, Chile
katherine.berrios@ug.uchile.cl

Cristián Eduardo Cortés Carrillo
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile
Santiago, Chile
ccortes@ing.uchile.cl

Pablo Andrés Rey
Departamento de Industria
Universidad Tecnológica Metropolitana
Santiago, Chile
prey@utem.cl

***Abstract*—Este estudio propone un modelo de programación entera mixta para la planificación integrada de vehículos y turnos de conductores en flotas híbridas de transporte público. Considera restricciones operativas, energéticas y laborales, y se basa en una red espacio-tiempo extendida. El enfoque busca minimizar costos operacionales garantizando una asignación eficiente de recursos. Inspirado en un operador real de Santiago en proceso de electrificación, el modelo se apoya en literatura reciente sobre programación colaborativa para flotas mixtas, contribuyendo al avance teórico y práctico de la planificación urbana sostenible.**

***Index Terms*—programación integrada, transporte público, flota mixta, buses eléctricos, red espacio-tiempo, Santiago.**

La transición hacia sistemas de transporte público más sostenibles ha incentivado la incorporación de buses eléctricos (EBs) en flotas compuestas históricamente por vehículos diésel (CBs). Esta coexistencia genera nuevos desafíos en la planificación operativa, especialmente en la programación simultánea de vehículos y conductores (Vehicle and Crew Scheduling Problem, VCSP). Tradicionalmente abordado de forma secuencial, el VCSP ha evolucionado hacia enfoques integrados que permiten aprovechar sinergias y reducir significativamente los costos operacionales [1], [2].

En este contexto, se propone un modelo de programación entera mixta para la planificación integrada de vehículos y turnos de conductores en flotas híbridas, considerando restricciones operativas, energéticas, de recarga, continuidad de servicios y normativas laborales. El modelo se estructura sobre una red espacio-tiempo extendida [3], [4], y busca minimizar los costos operacionales totales, garantizando cobertura completa de viajes y asignación eficiente de recursos.

El diseño metodológico está fundamentado en investigaciones recientes que han demostrado que los buses eléctricos requieren una asignación estratégica debido a su autonomía limitada, necesidad de recargas y tiempos de inactividad superiores a los buses diésel [5], [6]. En particular, el estudio de Cong, Bie, Liu y Zhu [7] plantea un modelo integrado de programación para flotas híbridas en múltiples rutas, integrando variables de asignación, recarga y turnos.

Esta investigación está inspirada en un caso real de un operador del transporte público de la Región Metropolitana que actualmente transita hacia una flota electrificada. Se emplean datos reales, considerando sus servicios, infraestructura de carga y distribución de flota por depósito.

Esta investigación contribuye tanto teórico como a la práctica de la planificación táctica y operativa en sistemas de transporte público con flotas híbridas, proponiendo un modelo adaptable a contextos urbanos reales en transición energética.

REFERENCES

[1] K. Haase, G. Desaulniers, and J. Desrosiers, "Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems," *Transportation Science*, vol. 35, no. 3, pp. 286–303, Aug. 2001.

[2] M. Mesquita and A. Paias, "Set partitioning/covering-based approaches for the integrated vehicle and crew scheduling problem," *Computers & Operations Research*, vol. 35, pp. 1562–1575, 2008.

[3] I. Steinzen, V. Gintner, L. Suhl, and N. Kliewer, "A time-space network approach for the integrated vehicle- and crew-scheduling problem with multiple depots," *Transportation Science*, vol. 44, no. 3, pp. 367–382, Aug. 2010.

[4] N. Kliewer, B. Amberg, and B. Amberg, "Multiple depot vehicle and crew scheduling with time windows for scheduled trips," *Public Transport*, vol. 3, pp. 213–244, 2012.

[5] L. Li, H. K. Lo, F. Xiao, and X. Cen, "Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 60, pp. 104–118, 2018.

[6] S. Shao, Z. Tan, Z. Liu, and W. Shang, "Balancing the GHG emissions and operational costs for a mixed fleet of electric buses and diesel buses," *Applied Energy*, vol. 328, 120188, 2022.

[7] Y. Cong, Y. Bie, Z. Liu, and A. Zhu, "Collaborative vehicle-crew scheduling for multiple routes with a mixed fleet of electric and fuel buses," *Energy*, vol. 298, 131400, 2024.

Integración de datos de telefonía celular y smart card para la estimación granular de evasión tarifaría en sistemas de transporte urbano

Paulina Quilodrán-Torres
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
paulina.quilodran.t@mail.pucv.cl

Franco Basso
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
franco.basso@pucv.cl

Raul Pezoa
School of Industrial Engineering
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile
raul.pezoa@udp.cl

Mauricio Varas
School of Engineering
Universidad del Desarrollo
Santiago, Chile
mavaras@udd.cl

***Abstract*—La evasión tarifaría en los sistemas de transporte urbano representa un desafío persistente a nivel financiero y en la equidad de acceso. Los métodos tradicionales de estimación, como las inspecciones manuales, presentan limitaciones en cobertura, resolución temporal y costos. En este trabajo, proponemos una metodología en desarrollo que busca estimar la evasión a nivel de estación en la red de Metro de Santiago, integrando datos de validaciones de tarjetas inteligentes con información anonimizada de localización proveniente de telefonía celular de la empresa Entel, junto con factores de expansión. La estrategia consiste en contrastar los volúmenes de ingreso observados mediante validaciones con los flujos de pasajeros inferidos a partir de trazas celulares, identificando discrepancias indicativas de potencial evasión. Mediante la calibración con datos oficiales y la aplicación de filtros espacio-temporales, se proyecta reconstruir la demanda por estación y estimar tasas de evasión con mayor granularidad. El estudio se encuentra en curso y contempla un análisis espacial y temporal de los patrones de evasión, con especial atención a estaciones periféricas, estaciones de transbordo y franjas horarias de alta demanda. Esta propuesta metodológica apunta a desarrollar una herramienta escalable y costo-efectiva para apoyar estrategias de fiscalización, monitorear el cumplimiento tarifario y orientar intervenciones en infraestructura y políticas públicas de transporte.**

***Index Terms*—tarjetas inteligentes, datos telefonía celular, evasión**

Franco Basso gratefully acknowledges the financial support from the Complex Engineering Systems Institute, ISCI (ANID-PIA/PUENTE AFB230002), ANID-FONDECYT 1241335, ANID-FONDEF ID25I10409 and ANID-FOVI 240048. Raúl Pezoa acknowledges the financial support from ANID-FONDECYT 1241913. Mauricio Varas acknowledges the financial support from ANID-FONDECYT 1241843. Paulina Quilodrán thanks doctoral scholarship to ANID-PFCHA/Doctorado Nacional/2025-21251056.

Session N°8 – Track N°2

Stochastic and Robust Optimization

Chair: Varas, M. *(Universidad del Desarrollo)*
Place: G6-055
Time: 15:30 – 16:45

Particle Swarm Optimisation applied on Robust Direct Aperture Optimisation in Intensity Modulated Radiotherapy Treatment

Time: 15:30 – 15:45
Authors:

- Tello-Valenzuela, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Cabrera-Guerrero, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Moyano, M. *(Universidad Católica del Norte)*

A Probing-Enhanced Stochastic Programming Approach for Lot-Sizing Problems

Time: 15:50 – 16:05
Authors:

- Quezada, F. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Gicquel, C. *(Université Paris-Saclay)*
- Kedad-Sidhoum, S. *(Conservatoire national des arts et métiers)*
- Pagnoncelli, B. *(Université Côte d'Azur)*

Estimación Estocástica de la Calidad del Aire en Osorno Utilizando Cadenas de Markov

Time: 16:10 – 16:25
Authors:

- Lagos, D. *(Universidad Católica de Temuco)*
- Campos, D. *(Universidad Católica de Temuco)*
- Reinecke, C. *(Universidad Católica de Temuco)*

Coalition Structure and Profit Allocation for the Collaborative Transportation Problem Under Uncertainty: A Two-Stage Adaptive Robust Optimization Approach

Time: 16:30 – 16:45
Authors:

- Varas, M. *(Universidad del Desarrollo)*
- Basso, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Contreras, J. *(Universidad Diego Portales)*
- Pezoa, R. *(Universidad Diego Portales)*
- Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*

Particle Swarm Optimisation applied on Robust Direct Aperture Optimisation in Intensity Modulated Radiotherapy Treatment

Gonzalo Tello-Valenzuela
Escuela de Ingeniería informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gonzalo.tello.v@mail.pucv.cl

Guillermo Cabrera-Guerrero
Escuela de Ingeniería informática
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
guillermo.cabrera@pucv.cl

Mauricio Moyano
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofasta, Chile
mauricio.moyano@ucn.cl

The direct aperture optimisation (DAO) problem is a Mixed-Integer optimisation problem arising in Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT) that seeks to find a set of apertures and intensities that lead to a clinically acceptable treatment plan. In DAO, the goal is to determine a set of aperture shapes and intensities that meet the constraints imposed by a physical device called the Multi-Leaf Collimator [4]. Further, since this problem has to deal with uncertainty sources such as the functionality of the linear accelerator (see Figure 1), patient breath or patient motion during the radiation process, we need to find a solution that performs well under different scenarios. Thus, in this work we propose a robust optimisation model to deal with one particular source of uncertainty namely the patient motion.

Fig. 1. Linear accelerator

Robust Optimisation is a mathematical field that aims to find solutions for optimisation problems that remain feasible in the presence of uncertainty of the system [1]. This uncertainty leads to the generation of a set of scenarios which represent different instances of the problem; therefore, a robust solution must satisfy the restrictions of each scenario. In the context of DAO, a robust treatment plan must account for any movements of the organs involved in the radiation process, minimise their impact while maximising radiation to the tumour, and simultaneously minimise radiation to the OARs.

In terms of the objective function, a robust treatment plan optimised under one scenario can be considerably harmful to the patient if a different scenario occurs, potentially leading to problems in healthy tissue due to over-radiation and/or issues in the tumour control due to under-irradiation.

In DAO aims to simultaneously optimise the intensities and aperture shapes for each beam ray in the BAC. Hence, their goal is to address and solve the FMO problem, considering the constraint on the number of deliverable apertures and the physical constraints related to the MLC sequencing. When a treatment plan is generated, it involves computing a set of aperture shapes and their corresponding intensities. Each aperture shape in the set is defined as a two-dimensional binary matrix, which is determined by the positions of the leaves of the MLC. If a leaf blocks the radiation coming from a specific beamlet, the value associated with such beamlet in the aperture would be 0, and 1 otherwise, as is shown in Figure 2.

To change the aperture shape, we need to move the leaves. Additionally, each leaf movement requires that the intensities associated with it must be adjusted; this process is known as aperture weight optimisation [3].

To modelate the problem mathematically it's neccesary discretise each beam angle and organs into beamlets and voxels respectively. First, the we model the dose distribution deposed in each voxel included by organ. Let A be a BAC and $x \in \mathbb{R}^n_{\geq 0}$ be an intensity vector or fluence map solution for A. Each vector component x_b represent the length of time that patient is exposed to the radiation of the b-th beamlet.

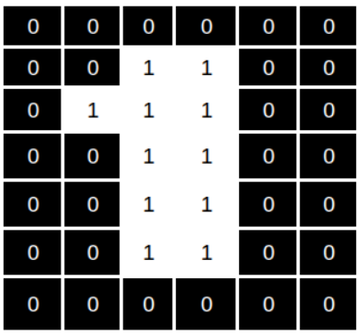


Fig. 2. Aperture Shape represented as binary matrix

Radiation dose deposited into each voxel v of region r by fluence map x is defined by:

$$d_v^r(x) = \sum_{b=1}^{n} (D_{v1i}^r x_b) \quad \forall v = 1, 2, \ldots, m^r \tag{1}$$

where n is the total number of beamlets, m^r is the total number of voxels in region r, $r \in \mathbb{R} = \{O_1, ..., O_Q, T\}$ is an element of the index set of regions, with the tumour indexed by $r = T$ and the organs at risk and normal tissue indexed by $r = O_q$ with $q = 1, ..., Q$. $D^r \in \mathbb{R}^{m^r x n}$ is the dose deposition matrix related to region r, where $D_{vb}^r \geqq 0$ defines the rate at which the radiation dose deposed by the beamlet b into the voxel v of region r. The set $\mathcal{X}(A) \subseteq \mathbb{R}^n$ is the set of all feasible fluence maps when the BAC A is considered.

In this study, we use a convex nonlinear penalty function also used in [3], where each voxel is penalised according to the squared difference of the amount of dose actually received by the voxel and the prescribed one. This formulation yields a quadratic programming problem with only linear non-negativity constraints on the fluence values [3]. This model is as follows:

$$\min_x \sum_{r \in R} \left[\frac{1}{m^r} \sum_{i=1}^{m^r} \left[\underline{\lambda}_r \left(Y_r - d_v^r(x) \right)_+^2 + \overline{\lambda}_r \left(d_v^r(x) - Y_r \right)_+^2 \right] \right] \tag{2}$$

Where parameter m^r is the number of voxels of region r defined before, and Y_i is the desired dose for voxel i for the same region. The function $(\cdot)_+$ is the maximum between 0 and $(\cdot)$, $d_v^r(x)$ gives the dose delivered by fluence map x to voxel v of region r (see Equation (1)), and $\underline{\lambda}_r$ and $\overline{\lambda}_r$ are the penalty weights parameter of underdose and overdose related to region r, respectively. Since this problem is convex the optimal fluence maps can be obtained using mathematical programming techniques.

On our proposal to consider the robust nature of the problem we evaluate the treatment plan over different scenarios, where we will have an ideal scenario (no patient movement) and four different scenarios with small perturbation. To resolved this problem in the robust context, we propose extend the Particle Swarm Optimisation algorithm (PSO) proposed in [5], considering evaluation over different scenarios. Following the PSO heuristic, a treatment plan in the model is represented as a particle of the swarm, where the movement arranges the aperture shapes, leaves positions, and intensities. Just as in [5], we also use a mathematical programming solver to optimise the apertures' intensities. The complete process proposed here is depicted in Figure 3.

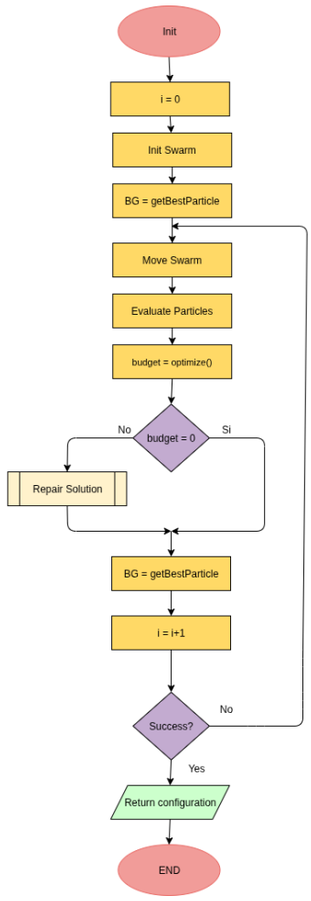


Fig. 3. PSO Flow diagrams to solve DAO

To apply robustness to DAO, the approach for selecting robust solutions in the Particle Swarm is the minimax function. This approach utilises the worst fitness value obtained by a solution in different scenarios and compares it to another solution using the same criteria, selecting the minimum value between them [6]. Therefore, the solution value that represents each treatment plan would be the one in its worst-case scenario.

A data instance from *CERR Package* with prostate cancer cases was used [2], selecting the beam angles *0,60,120,240,350* to irradiate the patient. The approach obtains the fluence map from the algorithm and evaluates it against five scenarios created by the selected instance. Those scenarios were made considering a movement of 5 [mm] from the isocenter, so each axis generates two additional scenarios.

Including the ideal scenario, the proposal will evaluate 5 scenarios, respecting the constraints on the OARs considered to prevent over-irradiation of healthy tissues. A total of 76 [Gy] is prescribed for the tumour. Additionally, the experiments were conducted using a total of 518 particles and 77 iterations, which is the same as [5].

The Table I presents the results of the PSO search process using the PSO with repair heuristic, without considering the robust optimisation process proposed by Tello-Valenzuela *et al.* [5], and the same method with the addition of a robust optimisation process. In Table I, scenario 1 is the ideal scenario (no patient movement), and scenarios 2-5 are made by moving the isocenter.

Heuristic	Scenario				
	1	2	3	4	5
PSO without robust process	68.80	715.88	394.67	472.71	184.2495
PSO with robust process	150.40	212.86	196.68	212.90	209.23

TABLE I
EXPERIMENT RESULTS FOR PSO WITHOUT AND WITH ROBUST PROCESS ON FIVE SCENARIOS FOR CERR INSTANCE

The results shown in Table I demonstrate the effectiveness of incorporating robustness into the DAO process through the proposed PSO strategy. The standard PSO method without robustness shows highly variable performance across scenarios, with objective values ranging from 68.80 in the ideal case to 715.88 under anatomical perturbations, indicating a severe degradation in treatment quality due to setup uncertainty. In contrast, the robust PSO approach significantly reduces this variability, maintaining objective values within a much narrower range across all scenarios. This confirms the method's ability to produce treatment plans that are more resilient to patient motion and anatomical variation.

In conclusion, the proposed robust DAO approach, utilising PSO and a min-max selection strategy, serves as a preliminary step toward generating aperture configurations and intensities that remain clinically acceptable under uncertainty. By explicitly integrating scenario-based robustness into the optimisation process, the method addresses a critical challenge in radiotherapy treatment planning-ensuring plan quality despite inherent anatomical perturbations. However, as evidenced in Table I, the quality of the ideal scenario is significantly degraded when using the robust method. This indicates a clear trade-off between robustness and plan quality under nominal conditions. As future work, we aim to enhance the algorithm's performance by reducing degradation in ideal cases while maintaining resilience across various scenarios.

REFERENCES

[1] A. Ben-Tal and A. Nemirovski. Robust truss topology design via semidefinite programming. *SIAM Journal on Optimization*, 7(4):991–1016, 1997.

[2] Joseph O. Deasy, Angel I. Blanco, and Vanessa H. Clark. Cerr: A computational environment for radiotherapy research. *Medical Physics*, 30(5):979–985, 2003.

[3] H Edwin Romeijn, Ravindra K Ahuja, James F Dempsey, Arvind Kumar, and Jonathan G Li. A novel linear programming approach to fluence map optimization for intensity modulated radiation therapy treatment planning. *Physics in Medicine and Biology*, 48(21):3521–3542, oct 2003.

[4] David M. Shepard, Matthew A. Earl, Xingxun Li, Shahid Naqvi, and Cedric X. Yu. Direct aperture optimization: a turnkey solution for step-and-shoot imrt. *Medical physics*, 29 6:1007–18, 2002.

[5] Gonzalo Tello-Valenzuela, Mauricio Moyano, and Guillermo Cabrera-Guerrero. Particle swarm optimisation applied to the direct aperture optimisation problem in radiation therapy. *Cancers*, 15(19), 2023.

[6] S. Verdu and H. Poor. On minimax robustness: A general approach and applications. *IEEE Transactions on Information Theory*, 30(2):328–340, 1984.

A probing-enhanced stochastic programming approach for lot-sizing problems

1st Franco Quezada
University of Santiago of Chile
Industrial Engineering Department
Santiago, Chile
franco.quezada@usach.cl

2nd Céline Gicquel
Université Paris-Saclay
LISN
Gif-sur-Yvette, France
gicquel@lisn.fr

3rd Safia Kedad-Sidhoum
Conservatoire national des arts et métiers
CEDRIC
Paris, France
kedad_sidhoum@cnam.fr

4th Bernardo Pagnoncelli
SKEMA Business School
Université Côte d'Azur
Lille, France
bernardo.pagnoncelli@skema.edu

We study the Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problem (MCLSP) under decision-dependent uncertainty, where managers can proactively acquire information before committing to production decisions. Motivated by contexts where demand correlates with observable covariates, such as competitor actions or consumer preferences, we adopt a probing-enhanced stochastic programming framework. In this setting, decision-makers strategically choose which covariates to probe, updating conditional demand distributions to enable more informed planning. Our contributions are threefold. First, we introduce the first formulation of the MCLSP with decision-dependent uncertainty, embedding probing actions into a three-stage stochastic program. Second, we develop a compact Big-M-free reformulation that removes non-anticipativity constraints, yielding stronger relaxations and enhanced computational stability. Third, we extend classical (k, U) inequalities and propose new value-function-based inequalities linking probing decisions with expected recourse costs. These cuts reinforce the formulation and accelerate convergence. We design a branch-and-cut algorithm integrating the proposed inequalities and a tailored primal heuristic, exploiting the problem's decomposable structure while remaining scalable. Computational experiments show that the formulation with value-function inequalities consistently outperforms classical models, reducing optimality gaps by up to 85%. The algorithm achieves near-optimal solutions, with average gaps below 1.5% even under tight capacity constraints and large scenario sets. Overall, our results highlight the value of integrating endogenous information acquisition into stochastic lot-sizing, offering scalable methods for proactive and data-driven production planning under uncertainty.

Estimación estocástica de la calidad del aire en Osorno utilizando cadenas de Markov

Dafne Lagos
Departamento de Procesos Industriales
Universidad Católica de Temuco
Temuco, Chile
dlagos@uct.cl
ORCID: 0000-0001-7574-7748

Dabbo Campos
Departamento de Procesos Industriales
Universidad Católica de Temuco
Temuco, Chile
dabbo.campos2021@alu.uct.cl
ORCID: 0009-0002-4721-7816

Carolina Reinecke
Departamento de Procesos Industriales
Universidad Católica de Temuco
Temuco, Chile
creinecke2021@alu.uct.cl
ORCID: 0009-0005-8565-9959

***Abstract*— This article presents the development of three discrete-time Markov chains to model air quality in Osorno, with data from April 1 to September 15, between 2013 and 2023. States are structured by combining the factors: air quality, temperature, precipitation, wind, and pressure. For the homogeneous model, the steady-state probabilities showed that 45% of the total probability is concentrated in four states (1, 3, 6, and 14), with average recurrence times of 8 to 9 days. Average first-passage times vary widely, reaching up to 1855 days. To improve short-term calibration and avoid the low frequency of some states, two smoothed inhomogeneous matrices with alpha equal to 1 and alpha equal to 0.5 are proposed. Finally, an initial probability vector was constructed, which was weighted for both the homogeneous and heterogeneous models to evaluate the probability of occurrence of each future state.**

Keywords—Markov Chain, Particulate matter, Air quality, Transition probabilities, Pollution.

I. INTRODUCIÓN

La contaminación del aire continúa siendo un riesgo para la salud pública, tanto costoso, como mortal. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que provoca casi 7 millones de muertes prematuras anuales y que el 99 % de la población mundial respira aire que rebasa las directrices sanitarias [1]. Este impacto se agrava en entornos urbanos con patrones de emisión complejos y altamente no lineales [2], [3].

En cuanto a Chile, existen varias ciudades que presentan indicadores de contaminación muy elevados. En este sentido, las cuidades del sur de país como Temuco, Osorno y Coyhaique son ciudades que históricamente presentan episodios de contaminación extrema durante los meses de invierno. A modo de ejemplo, la ciudad de Coyhaique es reconocida recurrentemente entre las urbes más contaminadas del planeta; donde el 23 de julio de 2025 registró la cantidad de 147 $\mu g\, m^{-3}$ de material particulado 2.5 ($PM_{2.5}$) [4]. En la misma línea, la ciudad de Osorno fue declarada zona saturada para material particulado 10 (PM_{10}) y $PM_{2.5}$ desde 2012.

De acuerdo al estudio de [5], en la cuidad de Osorno, la principal fuente generadora de contaminación del aire es la quema de leña, que tradicionalmente se utiliza como medio de calefacción. Además, la exposición a largo plazo a los principales componentes del material particulado fino ($PM_{2.5}$) se relaciona significativamente con un aumento en la mortalidad [6]; mientras que [7] mencionan que cada incremento de 10 $\mu g/m^3$ en la concentración de $PM_{2.5}$ se asocia con un aumento importante de la mortalidad respiratoria y cardiovascular. Por tanto, comprender y predecir las variaciones de los contaminantes presentes en el aire —en particular $PM_{2.5}$— resulta indispensable para emitir alertas tempranas, apoyar la toma de decisiones políticas y prevenir problemas de salud en la población [8]. En este contexto, existen factores ambientales como: vientos débiles, alturas reducidas de la capa límite planetaria [9] y altos niveles de humedad relativa [10], [11] que conforman un escenario meteorológico propicio para la acumulación de $PM_{2.5}$ y para el deterioro de la calidad del aire. Sin embargo, los factores que influyen sobre la calidad del aire presentan una marcada estacionalidad, variabilidad estocástica y transiciones abruptas entre estados de riesgo, lo que demanda marcos probabilísticos y de aprendizaje que capturen tanto la evolución determinista como la aleatoria del sistema [12].

Una de las herramientas que se basa en el comportamiento aleatorio de las variables involucradas es una cadena de Markov; donde [13] menciona que el comportamiento estocástico del API (Índice de contaminación del aire, por sus siglas en inglés) puede modelarse de manera efectiva utilizando una cadena de Markov en tiempo discreto.

Considerando lo anterior, este documento presenta un estudio de carácter exploratorio, basado en tres modelos de cadena de Markov de tiempo discreto, definidas específicamente para la ciudad de Osorno, y donde la definición de estado involucra variables ambientales y simultáneamente la condición de la calidad del aire, medida en función de la cantidad de $PM_{2.5}$ como parte del estado, siendo esto un elemento diferenciador con respecto a otros modelos.

II. CONCEPTOS GENERALES

A. Cadenas de Markov

Una cadena de Markov de tiempo discreto (DTMC, por sus singlas en inglés) es un proceso estocástico X(n), con $n \in N_0$, que toma valores en un espacio de estados finito o contable S [14], [15]. Es un modelo estocástico que caracteriza una secuencia de eventos posibles donde la probabilidad de cada estado depende solo del estado anterior [16]. Lo anterior da cuenta de la propiedad Marokovina de “falta de memoria”. Matemáticamente, una cadena de Markov es un proceso aleatorio que satisface la propiedad de que P{X {n+1} = j | X

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

0,...,X n} = P{X {n+1} = j | X n} para todos los estados i, j y n $\geqslant$ 0, donde P {ij} representa la probabilidad de transición de saltar del estado i al estado j [17]. La dinámica de una cadena de Markov en tiempo discreto sobre un espacio de estados finito está completamente caracterizada por su matriz de transición, en la cual cada elemento representa la probabilidad de pasar del estado i al estado j.[14], [18], [19].

B. Material Particulado

El material particulado (PM) está compuesto por una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. Según [20], el $PM_{2.5}$ es una mezcla compleja de carbono elemental, compuestos orgánicos, sulfatos, nitratos, amonio y trazas de metales. La exposición prolongada al $PM_{2.5}$ está fuertemente asociada con un mayor riesgo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica y cardiopatía isquémica [21]. Junto a los impactos en la salud, el PM está vinculado con las condiciones climáticas. [22] indica que los niveles de $PM_{2.5}$ tienden a incrementarse bajo condiciones de inversión térmica, baja velocidad del viento y alta humedad, lo que favorece su acumulación en capas bajas de la atmósfera.

III. DESARROLLO

Para el desarrollo de las cadenas de Markov, se construyeron los estados como una combinación de los siguientes factores: calidad del aire malo > 109 $\mu g\ m^{-3}$ de material particulado $PM_{2.5}$, existencia de precipitaciones > 1 mm, velocidad promedio del viento > 6 km hr^{-1}, presión atmosférica alta > 1000 hPa. Los rangos definidos se basaron en [23], [24], [25], [26]. Cada uno de los factores se codificaron de forma binaria, con valor uno si se presentaban en las condiciones definidas y valor cero, en caso contrario. Los datos recopilados están restringidos a los meses de invierno, considerando los valores diarios desde 01 de abril hasta el 15 de septiembre de los años 2013 a 2023. Toda la información es referida a la ciudad de Osorno y recogida desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire [27]. La TABLA I, muestra la conformación de cada estado.

TABLA I. DEFINICIÓN DE ESTADOS

Detalle de parámetro	Estado	Detalle de parámetro	Estado	Detalle de parámetro	Estado
0,0,0,0,0	0	0,1,0,1,1	11	1,0,1,1,0	22
0,0,0,0,1	1	0,1,1,0,0	12	1,0,1,1,1	23
0,0,0,1,0	2	0,1,1,0,1	13	1,1,0,0,0	24
0,0,0,1,1	3	0,1,1,1,0	14	1,1,0,0,1	25
0,0,1,0,0	4	0,1,1,1,1	15	1,1,0,1,0	26
0,0,1,0,1	5	1,0,0,0,0	16	1,1,0,1,1	27
0,0,1,1,0	6	1,0,0,0,1	17	1,1,1,0,0	28
0,0,1,1,1	7	1,0,0,1,0	18	1,1,1,0,1	29
0,1,0,0,0	8	1,0,0,1,1	19	1,1,1,1,0	30
0,1,0,0,1	9	1,0,1,0,0	20	1,1,1,1,1	31
0,1,0,1,0	10	1,0,1,0,1	21		

Sin embargo, el estado 26 presentó una frecuencia de ocurrencia igual a cero, por tanto, se eliminó. Un extracto de la matriz de transición de un paso final se presenta en las Fig. 1.

Pij	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,091	0,091	0,023	0,068	0,068	0,000	0,114	0,023	0,091	0,000	0,068
1	0,042	0,214	0,031	0,146	0,010	0,052	0,068	0,089	0,010	0,052	0,005
2	0,000	0,042	0,042	0,104	0,000	0,000	0,146	0,063	0,000	0,000	0,042
3	0,014	0,159	0,024	0,290	0,005	0,039	0,048	0,053	0,000	0,034	0,014
4	0,023	0,070	0,047	0,093	0,047	0,023	0,326	0,047	0,000	0,023	0,047
5	0,000	0,190	0,034	0,207	0,017	0,069	0,121	0,086	0,017	0,017	0,000
6	0,019	0,038	0,042	0,071	0,061	0,033	0,269	0,127	0,005	0,005	0,028
7	0,007	0,110	0,014	0,151	0,034	0,048	0,137	0,151	0,007	0,007	0,021
8	0,048	0,095	0,000	0,000	0,024	0,024	0,048	0,000	0,167	0,095	0,095
9	0,028	0,125	0,000	0,056	0,014	0,000	0,069	0,042	0,111	0,167	0,056
10	0,080	0,040	0,020	0,040	0,040	0,040	0,060	0,020	0,080	0,020	0,040
11	0,031	0,072	0,031	0,052	0,000	0,010	0,052	0,031	0,052	0,175	0,072
12	0,000	0,040	0,000	0,040	0,000	0,000	0,000	0,040	0,040	0,120	0,040
13	0,059	0,059	0,000	0,118	0,000	0,000	0,000	0,059	0,000	0,059	0,059
14	0,014	0,033	0,023	0,051	0,023	0,009	0,140	0,070	0,014	0,028	0,042
15	0,000	0,031	0,016	0,125	0,016	0,063	0,078	0,078	0,016	0,078	0,016
16	0,071	0,119	0,048	0,048	0,048	0,024	0,214	0,048	0,024	0,000	0,000
17	0,006	0,166	0,012	0,071	0,018	0,041	0,065	0,095	0,006	0,006	0,000
18	0,286	0,000	0,143	0,000	0,000	0,000	0,000	0,143	0,000	0,000	0,143
19	0,000	0,114	0,029	0,229	0,000	0,029	0,029	0,143	0,000	0,000	0,000
20	0,000	0,000	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,200	0,000	0,000	0,000
21	0,000	0,111	0,000	0,056	0,056	0,056	0,111	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,091	0,091	0,000	0,091	0,000	0,000	0,273	0,000	0,000	0,000	0,000
24	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,000	0,000
25	0,143	0,000	0,000	0,143	0,000	0,000	0,000	0,143	0,143	0,000	0,000
27	0,000	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,400	0,200	0,000	0,000	0,000
28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000	0,000	0,000
31	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000

Fig. 1. Extracto de la matriz de transición de un paso, para todos los estados i = (0, …, 31) y para los estados j = (0,…, 10).

En atención a la variabilidad de los datos a través del tiempo, y la baja frecuencia de ocurrencia de algunos estados, se desarrolló una matriz de transición no homogénea con suavizamiento para $\alpha = 1$ y $\alpha = 0.5$. Las Fig. 2. y Fig. 3, muestran un extracto de dichas matrices. En ambos casos, se dejó fuera el estado 26, a fin de poder generar una comparación con la matriz definida inicialmente (matriz homogénea).

Pij	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,030	0,054	0,035	0,060	0,032	0,034	0,092	0,050	0,021	0,021	0,026
1	0,030	0,078	0,034	0,090	0,026	0,038	0,086	0,062	0,020	0,020	0,022
2	0,029	0,058	0,035	0,072	0,030	0,033	0,087	0,056	0,020	0,020	0,024
3	0,029	0,077	0,034	0,104	0,023	0,037	0,079	0,061	0,019	0,020	0,022
4	0,028	0,048	0,037	0,056	0,035	0,034	0,101	0,055	0,022	0,020	0,027
5	0,030	0,064	0,036	0,074	0,029	0,036	0,088	0,056	0,020	0,020	0,025
6	0,027	0,057	0,036	0,073	0,033	0,034	0,120	0,063	0,017	0,018	0,025
7	0,027	0,062	0,034	0,084	0,031	0,035	0,096	0,061	0,020	0,020	0,024
8	0,033	0,048	0,035	0,050	0,033	0,036	0,078	0,049	0,026	0,024	0,029
9	0,030	0,055	0,034	0,062	0,031	0,036	0,091	0,052	0,024	0,021	0,029
10	0,030	0,050	0,034	0,060	0,031	0,033	0,084	0,048	0,024	0,022	0,028
11	0,030	0,048	0,034	0,058	0,031	0,033	0,083	0,050	0,028	0,024	0,031
12	0,028	0,048	0,033	0,055	0,032	0,033	0,085	0,048	0,025	0,022	0,029
13	0,029	0,052	0,034	0,061	0,032	0,032	0,075	0,050	0,025	0,023	0,028
14	0,024	0,053	0,033	0,065	0,034	0,033	0,112	0,056	0,020	0,019	0,027
15	0,025	0,054	0,031	0,075	0,032	0,035	0,094	0,057	0,024	0,019	0,025
16	0,029	0,058	0,036	0,062	0,031	0,035	0,090	0,053	0,021	0,021	0,026
17	0,029	0,081	0,033	0,073	0,027	0,040	0,087	0,064	0,017	0,018	0,019
18	0,031	0,052	0,035	0,055	0,031	0,033	0,076	0,050	0,024	0,023	0,027
19	0,029	0,064	0,033	0,070	0,029	0,036	0,079	0,058	0,021	0,021	0,023
20	0,031	0,050	0,035	0,056	0,031	0,034	0,076	0,051	0,025	0,023	0,027
21	0,029	0,053	0,034	0,056	0,032	0,035	0,081	0,055	0,024	0,022	0,026
22	0,031	0,050	0,036	0,056	0,032	0,034	0,081	0,053	0,024	0,023	0,027
23	0,031	0,052	0,035	0,062	0,030	0,033	0,075	0,051	0,024	0,023	0,027
24	0,031	0,050	0,035	0,056	0,031	0,034	0,075	0,050	0,024	0,023	0,027
25	0,032	0,054	0,035	0,055	0,032	0,034	0,078	0,052	0,024	0,023	0,026
27	0,031	0,052	0,035	0,058	0,032	0,034	0,078	0,053	0,024	0,023	0,027
28	0,031	0,052	0,035	0,062	0,030	0,033	0,075	0,051	0,024	0,023	0,027
29	0,030	0,052	0,035	0,058	0,031	0,035	0,076	0,052	0,025	0,023	0,027
30	0,031	0,051	0,035	0,056	0,031	0,034	0,076	0,051	0,024	0,023	0,027
31	0,031	0,052	0,035	0,058	0,032	0,034	0,078	0,053	0,024	0,023	0,027

Fig. 2. Extracto de la matriz de transición no homogénea con suavizamiento de $\alpha = 1$, para todos los estados i = (0, …, 31) y para los estados j = (0,…, 10).

Pij	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,091	0,039	0,013	0,065	0,065	0,013	0,039	0,013	0,117	0,013	0,065
1	0,037	0,200	0,020	0,151	0,012	0,037	0,029	0,086	0,020	0,078	0,012
2	0,018	0,018	0,053	0,158	0,018	0,018	0,053	0,053	0,018	0,018	0,053
3	0,013	0,176	0,021	0,245	0,013	0,039	0,030	0,030	0,004	0,056	0,021
4	0,017	0,051	0,017	0,017	0,051	0,051	0,119	0,017	0,017	0,051	0,085
5	0,013	0,173	0,040	0,120	0,013	0,013	0,093	0,013	0,013	0,040	0,013
6	0,008	0,085	0,023	0,085	0,054	0,023	0,147	0,085	0,023	0,023	0,023
7	0,007	0,088	0,020	0,129	0,020	0,048	0,061	0,116	0,020	0,007	0,048
8	0,028	0,084	0,009	0,009	0,028	0,009	0,047	0,009	0,140	0,084	0,084
9	0,030	0,114	0,006	0,054	0,018	0,006	0,054	0,042	0,090	0,150	0,042
10	0,087	0,049	0,010	0,049	0,010	0,029	0,010	0,010	0,087	0,029	0,049
11	0,027	0,070	0,027	0,038	0,005	0,016	0,038	0,038	0,049	0,178	0,070
12	0,013	0,038	0,013	0,038	0,013	0,013	0,013	0,013	0,038	0,089	0,038
13	0,048	0,016	0,016	0,079	0,016	0,016	0,016	0,048	0,016	0,048	0,048
14	0,026	0,048	0,019	0,041	0,011	0,011	0,056	0,086	0,026	0,048	0,048
15	0,009	0,026	0,026	0,111	0,009	0,060	0,043	0,060	0,009	0,094	0,026
16	0,046	0,108	0,015	0,046	0,046	0,046	0,046	0,015	0,046	0,015	0,015
17	0,007	0,159	0,007	0,062	0,021	0,021	0,021	0,076	0,021	0,021	0,007
18	0,091	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
19	0,021	0,064	0,021	0,106	0,021	0,021	0,021	0,106	0,021	0,021	0,021
20	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
21	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,073	0,024	0,024	0,024	0,024
22	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,091	0,030	0,030	0,030	0,030
23	0,030	0,030	0,030	0,091	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
24	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,077	0,026	0,026
25	0,070	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,070	0,070	0,023	0,023
27	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,091	0,030	0,030	0,030
28	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
29	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,091	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
30	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
31	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,091	0,030	0,030	0,030

Fig. 3. Extracto de la matriz de transición no homogénea con suavizamiento de $\alpha = 1$, para todos los estados i = (0, …, 31) y para los estados j = (0,…, 10).

Con la información completa de las matrices asociadas a las Fig. 1, Fig. 2 y Fig. 3, se evaluó la probabilidad de estados futuros, considerando un vector de probabilidades iniciales. Este vector se estableció a partir de la frecuencia de ocurrencia registrada, para cada estado. Los componentes del vector son: (0,0238; 0,1039; 0,026; 0,112; 0,0233; 0,0314; 0,1147; 0,079; 0,0227; 0,039; 0,0271; 0,0525; 0,0135; 0,0092; 0,1163; 0,0346; 0,0227; 0,0915; 0,0038; 0,0189; 0,0027; 0,0097; 0,0043; 0,006; 0,0022; 0,0038; 0,0027; 0,0005; 0,0005; 0,0011; 0,0005). Los valores extremos para cada caso, se resumen en la Fig. 4.

Matrices	Probabilidad Max.	Probabilidad Min.
Asociada a la Fig. 1.	0,1163 (Estado 14)	0,0005 (Estados 28, 29 y 31)
Asociada a la Fig. 2.	0,0932 (Estado 6)	0,0168 (Estados 24, 28, 29 y 31)
Asociada a la Fig. 3.	0,1035 (Estado 14)	0,0083 (Estado 30)

Fig. 4. Valores extremos de probabilidad y estados, según tipo de matriz..

Por otro lado, se determinaron las probabilidades de estado estable y los tiempos esperados de recurrencia, a partir de los datos totales asociado a la matriz de la Fig. 1. A modo de ejemplo de los resultados, las probabilidades y tiempos esperados de recurrencia extremos fueron de: 0,054% con 1850,15 días (estado 28); y de 11,636% con 8,59 días (estado14). De manera adicional, con la información de dicha matriz, se pudo obtener los tiempos esperados de primera pasada. A modo de ejemplo, se determinó que la cantidad promedio de tiempo para pasar del estado 0 al estado 31 es de 1845 días, mientras que para pasar del estado 0 al estado 16 es de 46 días, en promedio.

La información construida, permite estimar las probabilidades de ocurrencia de diversos escenarios, con días de anticipación. Esto permite establecer alertas anticipadas, sobre el comportamiento de la calidad de aire en Osorno, ayudando a tomar medidas que contribuyan a mejorar la salud de la población, como también a generar políticas de descontaminación integrales.

IV. Conclusiones

Producto de los datos disponibles fue posible establecer para la ciudad de Osorno, tres matrices de probabilidad de transición para un conjunto de estados que incorporan de forma simultánea variables ambientales y la calidad del aire.

Para el modelo homogéneo, se determinaron las probabilidades de estado estable, donde los estados 1, 3, 6 y 14 presentan valores superiores al 10% de probabilidad, y los menores tiempos esperados de recurrencia. Los tiempos esperados de primera pasada, mostraron una amplia gama de valores.

Al incorporar un vector de probabilidades iniciales, fue posible establecer valores de probabilidad de ocurrencia de estados futuros, para los modelos no homogéneo, con $\alpha = 1$ y $\alpha = 0.5$, como también para el modelo homogéneo.

Esta información puede contribuir al desarrollo de nuevas estrategias y políticas para apoyar el proceso de descontaminación de la ciudad de Osorno. De igual manera permite generar medidas y alertas tempranas sobre potenciales episodios de alta contaminación que afectan a la salud y calidad de vida de la población.

Referencias

[1] W. H. Organization, “Billions of people still breathe unhealthy air: New WHO data,” 2022. [Online]. Available: https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data

[2] J.-C. Chen and Y. J. Wu, “Discrete-time Markov chain for prediction of air quality index,” *J Ambient Intell Humaniz Comput*, May 2020, doi: 10.1007/s12652-020-02036-5.

[3] N. N. Zakaria, M. Othman, R. Sokkalingam, H. Daud, L. Abdullah, and E. Abdul Kadir, “Markov Chain Model Development for Forecasting Air Pollution Index of Miri, Sarawak,” *Sustainability*, vol. 11, no. 19, p. 5190, Sep. 2019, doi: 10.3390/su11195190.

[4] IQAir, “Coyhaique Air Quality Index (AQI) and Chile Air Pollution,” 2025.

[5] A. Nakamura, N. Nakatani, F. Maruyama, and et al., “Characteristics of PM2.5 pollution in Osorno, Chile,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 2, p. 168, 2022, doi: 10.3390/atmos13020168.

[6] Y. Wei *et al.*, “Short term exposure to fine particulate matter constituents and mortality in the United States: a national analysis of 13 million deaths from 2000 to 2016,” *Environ Health Perspect*, vol. 130, no. 4, p. 47006, 2022, doi: 10.1289/EHP9532.

[7] Y. Guo *et al.*, “The chronic effects of particulate matter (PM2.5, PM10 and PM1) on the morbidity and mortality of cardiovascular and respiratory diseases in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis,” *Int J Public Health*, 2023, [Online]. Available: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37056647/

[8] N. Zaini, L. W. Ean, A. N. Ahmed, M. A. Malek, M. F. Chow, and others, “PM2.5 forecasting for an urban area based on deep learning and decomposition method,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 17565, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-21769-1.

[9] C. Fang, X. Li, J. Li, J. Tian, and J. Wang, “Impact of meteorological conditions on PM2.5 pollution in Changchun and associated health risks analysis,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 5, p. 616, 2024, doi: 10.3390/atmos15050616.

[10] M. Rahman and L. Meng, “Examining the spatial and temporal variation of PM2.5 and its linkage with meteorological conditions in Dhaka, Bangladesh,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 12, p. 1426, 2024, doi: 10.3390/atmos15121426.

[11] X. Sun, T. Zhao, D. Liu, S. Gong, J. Xu, and X. Ma, “Quantifying the influences of PM2.5 and relative humidity on change of atmospheric visibility over recent winters in an urban area of East China,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, no. 5, p. 461, 2020, doi: 10.3390/atmos11050461.

[12] J. Holmes and S. Hassini, “Discrete-Time Markov Chain Modelling of the Ontario Air Quality Health Index,” *Water Air Soil Pollut*, vol. 232, no. 4, p. 158, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11270-021-05096-1.

[13] Y. Alyousifi, N. S. Masseran, and K. Ibrahim, “Modeling the stochastic dependence of air pollution index data using discrete-time Markov chains: Application to API data in Klang, Malaysia,” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 32, no. 7, pp. 1603–1611, 2018, doi: 10.1007/s00477-017-1443-7.

[14] D. Woukeng, “Persistent homology of Morse decomposition in Markov chains based on combinatorial multivector fields,” 2025.

[15] M. Zukerman, “Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models,” *arXiv.org*, 2013.

[16] Y. Gao, “A Markov Chain Model of Air Quality Index: Modelling and Simulation,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1575, no. 1, p. 012209, Jun. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1575/1/012209.

[17] M. Akhmet, M. Tleubergenova, and A. Zhamanshin, “Unpredictable solutions of Duffing type equations with Markov coefficient,” *Carpathian Journal of Mathematics*, 2023.

[18] Y. Dai, D. Han, and W. Dai, “Modeling and Computing of Stock Index Forecasting Based on Neural Network and Markov Chain,” *ScientificWorldJournal*, 2014.

[19] A. Alizadeh and N. Nomikos, “A Markov regime switching approach for hedging stock indices,” 2004.

[20] Y. Xie, B. Zhao, L. Zhang, R. Luo, and X. Huang, “$PM_{2.5}$ chemical composition and light extinction coefficient over the North China Plain: seasonal variability and implications for visibility impairment,” *Atmos Environ*, vol. 215, p. 116889, 2019, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116889.

[21] A. J. Cohen *et al.*, “Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015,” *The Lancet*, vol. 389, no. 10082, pp. 1907–1918, 2017, doi: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6.

[22] Y. Liu, M. Shao, L. Fu, S. Lu, L. Zeng, and D. Tang, “The impact of meteorological factors on $PM_{2.5}$ pollution in China,” *Atmos Environ*, vol. 192, pp. 739–748, 2018, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.08.063.

[23] J. J. Acuña *et al.*, “Airborne bacterial community associated with fine particulate matter (PM2.5) under different air quality indices in Temuco city, southern Chile,” *Arch Microbiol*, vol. 204, no. 2, p. 148, Feb. 2022, doi: 10.1007/s00203-021-02740-6.

[24] I. Moletto-Lobos, C. Mattar, and J. Barichivich, “Performance of Satellite-Based Evapotranspiration Models in Temperate Pastures of Southern Chile,” *Water (Basel)*, vol. 12, no. 12, p. 3587, Dec. 2020, doi: 10.3390/w12123587.

[25] L. Rodríguez-López, I. Duran-Llacer, L. González-Rodríguez, R. Cardenas, and R. Urrutia, “Retrieving Water Turbidity in Araucanian Lakes (South-Central Chile) Based on Multispectral Landsat Imagery,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 16, p. 3133, Aug. 2021, doi: 10.3390/rs13163133.

[26] M. Husein *et al.*, “Impact of meteorological factors on transmission of respiratory viruses across all age groups in the hot arid climate in Qatar,” *Front Public Health*, vol. 13, Jun. 2025, doi: 10.3389/fpubh.2025.1568049.

[27] SINCA (Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire), “National Air Quality Information System,” 2024. [Online]. Available: https://sinca.mma.gob.cl/index.php/estacion/index/key/A01

Coalition structure and profit allocation for the collaborative transportation problem under uncertainty: a two-stage adaptive robust optimization approach

1st Mauricio Varas
Facultad de Ingeniería
Universidad del Desarrollo
Santiago, Chile
mavaras@udd.cl

2nd Franco Basso
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
franco.basso@gmail.com

3rd Juan Pablo Contreras
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile
juan.contrerasff@gmail.com

4rd Raúl Pezoa
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile
raul.pezoa@udp.cl

5rd Armin Luer
Facultad de Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Concepción, Chile
armin.luer@unab.cl

***Abstract*—This paper addresses the generation of robust coalition structures that account for all possible realizations of the random profits generated within a collaborative transportation problem. Specifically, we formulate this problem as a two-stage adaptive robust optimization model, where the uncertain parameters are contained within a polyhedral uncertainty set. To solve this problem, we design and implement a Benders-based decomposition algorithm for computing robust solutions. Our results demonstrate that deviations from nominal values significantly impact profit allocations and the stability of the coalitions formed.**

***Index Terms*—Two-stage robust optimization, cooperative game theory, coalition structure, profit allocation.**

I. A TWO-STAGE FORMULATION FOR THE COALITION STRUCTURE AND PROFIT ALLOCATION PROBLEM

Consider the following sets, parameters, and decision variables.

Sets

$\mathcal{F}$: set of players (indexed by f).
$\mathcal{K}$: set of coalitions (indexed by k).
$\mathcal{F}_k$: set of players that belongs to coalition $k \in \mathcal{K}$ (indexed by f).

Parameters

$R_k \in \mathbb{R}_+$: revenue of coalition $k \in \mathcal{K}$.
$C_k \in \mathbb{R}_+$: coordination cost of coalition $k \in \mathcal{K}$.
$U_k = R_k - C_k \in \mathbb{R}_+$: profit of coalition $k \in \mathcal{K}$.

Identify applicable funding agency here. If none, delete this.

Decision variables

$x_k \in \{0,1\}$: it takes value 1 if coalition $k \in \mathcal{K}$ is formed, and 0 otherwise.
$y_{kf} \in \mathbb{R}_+$: profit allocated to player $f \in \mathcal{F}$ in coalition $k \in \mathcal{K}$.
$s_k \in \mathbb{R}_+$: rationality constraint violation for coalition $k \in \mathcal{K}$.

The two-stage model for the coalition structure and profit allocation problem, which builds on the strong stability model developed by [1], is formulated as problem (1)–(3), where the second-stage value function, $Q(x)$, is defined by (4)–(8).

$$\max_{x} \quad Q(x) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k\in\mathcal{K}: f\in\mathcal{F}_k} x_k = 1 \quad \forall f \in \mathcal{F} \tag{2}$$

$$x_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{3}$$

$$Q(x) = \max_{y,s} \sum_{k\in\mathcal{K}} \sum_{f\in\mathcal{F}_k} y_{kf} - \sum_{k\in\mathcal{K}} s_k \tag{4}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k'\in\mathcal{K}} \sum_{f\in\mathcal{F}_k\cap\mathcal{F}_{k'}} y_{k'f} \geq U_k - s_k \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{5}$$

$$\sum_{f\in\mathcal{F}_k} y_{kf} = U_k x_k \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{6}$$

$$y_{kf} \geq 0 \quad \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}_k \tag{7}$$

$$s_k \geq 0 \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{8}$$

The first stage of this two-stage program seeks a coalition structure that optimizes the second-stage value function. In this stage, constraint (2) ensures that each player belongs to

exactly one coalition, while constraint (3) defines the binary nature of the coalition formation variable. For the second stage, the objective function (4) maximizes the total allocated profit among players while minimizing the instability of the coalition structure. In this stage, constraint (5) generalizes the strong stability condition defined in [1]. When $s_k = 0$, strong stability holds, meaning that no players, whether from the same or different coalitions, have incentives to form a new coalition. Conversely, when $s_k > 0$, strong stability is violated, and s_k quantifies the instability for that coalition. On the other hand, constraint (6) enforces the efficiency condition, ensuring that for any coalition formed, the total profit allocated to the players equals the coalition's profit. Lastly, constraints (7) and (8) define the nature of the second-stage decision variables.

II. The collaborative transportation problem

Consider the distribution of goods from warehouses to customers. Suppose there is a set of companies $\mathcal{F}$, each managing a warehouse with a supply capacity S_f and facing a customer demand D_f. For simplicity, any demand exceeding the warehouse's capacity is considered lost. In this context, a collaborative approach allows firms to access additional distribution capabilities and efficiently use their underutilized capacities.

Let $\mathcal{F}_k$ represent a subset of companies that decide to collaborate. For all $f, f' \in \mathcal{F}_k$, let $z_{kff'}$ denote the amount of demand from company f' that is supplied by company f within coalition $k \in \mathcal{K}$. A mathematical formulation of the nominal collaborative transportation problem for coalition $k \in \mathcal{K}$ is given by the following linear programming problem.

$$\max_{z} \quad \sum_{f\in\mathcal{F}_k}\sum_{f'\in\mathcal{F}_k} z_{kff'} \tag{9}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{f'\in\mathcal{F}_k} z_{kff'} \le S_f \quad \forall f \in \mathcal{F}_k \tag{10}$$

$$\sum_{f\in\mathcal{F}_k} z_{kff'} \le D_{f'} \quad \forall f' \in \mathcal{F}_k \tag{11}$$

$$z_{kff'} \ge 0 \quad \forall f, f' \in \mathcal{F}_k \tag{12}$$

The objective function (9) maximizes the total quantity transported between warehouses and customers. Constraint (10) ensures that the total amount supplied from each warehouse does not exceed its capacity, while constraint (11) ensures that the amount delivered to each customer does not exceed their demand. Finally, constraint (12) defines the nature of the decision variables.

III. The dual formulation of the nominal collaborative transportation problem

Let u_{kf} and $v_{kf'}$ represent the dual variables associated with the supply and demand constraints, respectively, in the collaborative transportation problem. The dual of the nominal collaborative transportation problem is given as follows:

$$\min_{u,v} \quad \sum_{f\in\mathcal{F}_k} S_f u_{kf} + \sum_{f'\in\mathcal{F}_k} D_{f'} v_{kf'} \tag{13}$$

$$\text{s.t.} \quad u_{kf} + v_{kf'} \ge 1 \quad \forall f, f' \in \mathcal{F}_k \tag{14}$$

$$u_{kf} \ge 0 \quad \forall f \in \mathcal{F}_k \tag{15}$$

$$v_{kf'} \ge 0 \quad \forall f' \in \mathcal{F}_k \tag{16}$$

By strong duality, since the collaborative transportation problem is feasible and bounded, its dual is also feasible and bounded, and their objective values are equal.

IV. Revenues, coordination costs and the characteristic function of the coalitional game

The revenues from the collaboration are determined by repeatedly solving the collaborative transportation problem for each coalition. Specifically, let $z^*_{kff'}$ denote the optimal solution to problem (9) to (12). Then, the revenues R_k are computed as:

$$R_k = \sum_{f\in\mathcal{F}_k}\sum_{f'\in\mathcal{F}_k} z^*_{kff'} \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{17}$$

For this case, we represent coordination costs as a convex increasing function of coalition size, capturing the growing complexity of managing larger coalitions. Equation (18) defines the coordination cost function, where $|\mathcal{F}_k|$ represents the cardinality of coalition k, and α is a positive constant:

$$C_k = \alpha \frac{|\mathcal{F}_k|(|\mathcal{F}_k|-1)}{|\mathcal{F}_k|+1} \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{18}$$

Given the revenues and costs, the characteristic function of this coalitional game with transferable profits is given by (19):

$$U_k = R_k - C_k = \sum_{f\in\mathcal{F}_k}\sum_{f'\in\mathcal{F}_k} z^*_{kff'} - \alpha\frac{|\mathcal{F}_k|(|\mathcal{F}_k|-1)}{|\mathcal{F}_k|+1}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \tag{19}$$

V. Modeling demand uncertainty

We assume that, for each company $f \in \mathcal{F}$, the customer demand D_f is a symmetric, independent, and bounded random variable within the interval $[\bar{D}_f - \hat{D}_f, \bar{D}_f + \hat{D}_f]$. Additionally, we assume that the sum of the scaled deviations across all companies is bounded by Γ. Therefore, demand uncertainty is modeled using the following polyhedral uncertainty set [2]:

$$\mathcal{D}(\Gamma) := \{D \in \mathbb{R}^{|\mathcal{F}|} : \; D_f = \bar{D}_f + r_f \hat{D}_f, \forall f \in \mathcal{F}, r \in \mathcal{R}(\Gamma)\} \tag{20}$$

where, $\mathcal{R}(\Gamma)$, defined below, is set of allowed deviations.

$$\mathcal{R}(\Gamma) := \{r \in \mathbb{R}^{|\mathcal{F}|} : \; \sum_{f\in\mathcal{F}} |r_f| \le \Gamma, -1 \le r_f \le 1, \forall f \in \mathcal{F}\} \tag{21}$$

VI. Robust coalition structure and profit allocation problem

The robust coalition structure and profit allocation problem, denoted as $P(\Gamma)$, aims to select the coalition structure that maximizes the allocated profits and ensures the highest possible stability under the worst-case customer demand scenario. A two-stage adaptive robust formulation for coalition structure and profit allocation problem under uncertainty is given by:

$$
\begin{aligned}
P(\Gamma): \quad \max_{x} \quad & Q_R(x,\Gamma) \\
\text{s.t.} \quad & \sum_{k\in\mathcal{K}: f\in\mathcal{F}_k} x_k = 1 \quad \forall f \in \mathcal{F} \\
& x_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in \mathcal{K}
\end{aligned}
$$

where,

$$
\begin{aligned}
Q_R(x,\Gamma) = \min_{D\in\mathcal{D}(\Gamma)} \max_{w,z,u,v,y,s} & \sum_{k\in\mathcal{K}} \sum_{f\in\mathcal{F}_k} y_{kf} - \sum_{k\in\mathcal{K}} s_k \\
\text{s.t.} \quad \sum_{k'\in\mathcal{K}} \sum_{f\in\mathcal{F}_k\cap\mathcal{F}_{k'}} y_{k'f} &\geq \sum_{f\in\mathcal{F}_k} \sum_{f'\in\mathcal{F}_k} z_{kff'} - C_k - s_k && \forall k \in \mathcal{K} \\
\sum_{f\in\mathcal{F}_k} y_{kf} &= \sum_{f\in\mathcal{F}_k} \sum_{f'\in\mathcal{F}_k} w_{kff'} - C_k x_k && \forall k \in \mathcal{K} \\
\sum_{f\in\mathcal{F}_k} \sum_{f'\in\mathcal{F}_k} z_{kff'} &= \sum_{f\in\mathcal{F}_k} S_f u_{kf} + \sum_{f'\in\mathcal{F}_k} D_{f'} v_{kf'} && \forall k \in \mathcal{K} \\
\sum_{f'\in\mathcal{F}_k} z_{kff'} &\leq S_f && \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}_k \\
\sum_{f\in\mathcal{F}_k} z_{kff'} &\leq D_{f'} && \forall k \in \mathcal{K}, f' \in \mathcal{F}_k \\
u_{kf} + v_{kf'} &\geq 1 && \forall k \in \mathcal{K}, f, f' \in \mathcal{F}_k \\
w_{kff'} &\leq M x_k && \forall k \in \mathcal{K}, f, f' \in \mathcal{F}_k \\
w_{kff'} &\leq z_{kff'} && \forall k \in \mathcal{K}, f, f' \in \mathcal{F}_k \\
w_{kff'} &\geq z_{kff'} - M(1-x_k) && \forall k \in \mathcal{K}, f, f' \in \mathcal{F}_k \\
w_{kff'} &\geq 0 && \forall k \in \mathcal{K}, f, f' \in \mathcal{F}_k \\
z_{kff'} &\geq 0 && \forall k \in \mathcal{K}, f, f' \in \mathcal{F}_k \\
u_{kf} &\geq 0 && \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}_k \\
v_{kf'} &\geq 0 && \forall k \in \mathcal{K}, f' \in \mathcal{F}_k \\
y_{kf} &\geq 0 && \forall k \in \mathcal{K}, f \in \mathcal{F}_k \\
s_k &\geq 0 && \forall k \in \mathcal{K}
\end{aligned}
$$

References

[1] Guajardo, M., & Ronnqvist, M. (2015). Operations research models for coalition structure in collaborative logistics. European Journal of Operational Research, 240(1), 147-159.

[2] Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. Operations research, 52(1), 35-53.

Session N°8 – Track N°3

Vehicle Routing Problem (VRP)

Chair: Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*
Place: G6-056
Time: 15:30 – 16:45

Propuesta de Modelo Matemático para una Nueva Variante del VRP con Tiempos de Liberación, Vehículo de Recarga y Uso de Sitios Satélites

Time: 15:30 – 15:45
Authors:

- Soto-Concha, R. *(Universidad de Los Lagos)*
- Latorre-Núñez, G. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Morillo-Torres, D. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
- Linfati, R. *(Universidad del Bío-Bío)*

A Mixed-integer Linear Programming Model for the Generalized Clustered Median Tour Problem

Time: 15:50 – 16:05
Authors:

- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Obreque, C. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Campuzano, G. *(Delft University of Technology)*
- Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Gutiérrez-Jarpa, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Evaluación de un Enfoque Heurístico Conjunto para Minimizar la Tardanza en el Ruteo de Pedidos en Condiciones de Congestión Implementando Simulación

Time: 16:10 – 16:25
Authors:

- Mercado-Cabarcas, M. *(Universidad del Atlántico)*
- Mendoza-Casseres, D. *(Universidad del Atlántico)*

Automatic Generation of Metaheuristic Algorithms for the Pollution Traveling Salesman Problem

Time: 16:30 – 16:45
Authors:

- Erices-Vera, J. *(Universidad de Concepción)*
- Contreras-Bolton, C. *(Universidad de Concepción)*

Propuesta de modelo matemático para una nueva variante del VRP con tiempos de liberación, vehículo de recarga y uso de sitios satélites

Raúl Soto-Concha
Facultad de Ingeniería
Universidad del Bío–Bío
Concepción, Chile
rsotoco@ubiobio.cl

Guillermo Latorre-Núñez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad del Bío–Bío
Concepción, Chile
glatorre@ubiobio.cl

Daniel Morillo-Torres
Department of Civil and Industrial Engineering Sciences
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Cali,Colombia
daniel.morillo@javerianacali.edu.co

Rodrigo Linfati
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad del Bío–Bío
Concepción, Chile
rlinfati@ubiobio.cl

***Abstract*— El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) es un desafío clásico en la logística de última milla, cuya complejidad se incrementa al considerar restricciones dinámicas como los tiempos de liberación de productos. Este trabajo propone una nueva variante del VRP en la cual los clientes solicitan dos tipos de productos: unos disponibles desde el inicio de la jornada y otros con disponibilidad diferida (tiempo de liberación tardía). Para evitar que los vehículos de reparto deban retornar al depósito central a mitad de la jornada para recoger los productos con tiempos de liberación tardíos, se propone una estrategia de reabastecimiento en ruta mediante la coordinación con un camión principal. Este camión transporta los productos tardíos y se encuentra con los vehículos de reparto en sitios satélites, permitiendo la entrega eficiente de todos los productos en una sola jornada. Se desarrolla un modelo matemático que busca minimizar la distancia total recorrida, respetando las restricciones de capacidad, sincronización temporal, y coordinación logística. Los resultados muestran la validez del enfoque en instancias de pequeño tamaño.**

Keywords—Tiempos de liberación, Logística, Satélites, Reabastecimiento.

I. Introducción

La capacidad de los vehículos es un aspecto crucial, ya que cuando la demanda de los clientes excede esta capacidad, aumenta el número de viajes de retorno al depósito central. Para mitigar esto, pueden utilizarse almacenes satélite o vehículos de mayor capacidad [3]. En este contexto, han surgido diversas variantes del VRP para abordar estos desafíos, entre ellas el Feeder VRP (FVRP), donde los vehículos pequeños pueden ser reabastecidos en ruta [4], el Real-Time VRP (RTVRP), que se enfoca en escenarios de entrega bajo incertidumbre (cambios en las solicitudes, ventanas de tiempo y otros factores dinámicos) [5], el Collaborative VRP (CVRP) [1], mediante la colaboración entre empresas, compartiendo capacidades de sus flotas para recoger pedidos de varias firmas y planificar rutas de forma conjunta [6], y el Line Feeder Vehicle Routing Problem (LFVRP) [7], donde camiones de alta capacidad abastecen a vehículos más pequeños en ruta, por lo que los vehículos de reparto no tienen la necesidad de regresar constantemente al depósito central.

Otro concepto relevante es el VRP con Tiempos de Liberación (VRP-RT) [8], donde los productos tienen restricciones de tiempo de disponibilidad. De manera similar, el Inventory Routing Problem with Satellite Facilities (IRPSF) introduce la gestión de inventarios junto con la optimización de rutas, utilizando depósitos satélite para reabastecer vehículos en tránsito [9].

Este estudio propone una nueva variante del VRP con Tiempos de Liberación y uso de Satélites (VRPRT-S), en la que los productos se clasifican según su disponibilidad, algunos desde el inicio (tiempo de liberación cero), mientras que otros se liberan en un momento posterior específico (por ejemplo, al mediodía). La distribución se organiza en dos fases, coordinando la entrega de ambos tipos de productos mediante un sistema de reabastecimiento en ruta, donde un camión abastece a los vehículos de reparto en sitios satélites. Este mecanismo evita que los vehículos deban regresar al depósito central o que se requiera el uso de una segunda flota para completar las entregas.

La principal contribución de esta investigación es integrar tres componentes logísticos exigentes: (i) productos con liberación tardía, (ii) un camión de recarga y (iii) satélites móviles como puntos de reabastecimiento para los vehículos de reparto. Desarrollamos un modelo que coordina el camión de recarga con las rutas de distribución y selecciona los satélites móviles de modo que el reabastecimiento ocurra antes o en la primera entrega del producto con liberación tardía, garantizando llegadas sincronizadas y una única visita por cliente. Esta coordinación elimina retornos al depósito, respeta las restricciones de capacidad y ventanas de tiempo, y minimiza la distancia total recorrida por la flota, ofreciendo una solución más eficiente.

A. Revisión de Literatura

El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) es uno de los problemas fundamentales en la

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

investigación de operaciones aplicada a la logística y el transporte, y ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas seis décadas [1]. [2] señalan que las empresas buscan optimizar las rutas dentro de sus redes logísticas para reducir los costos de transporte y operación.

Entre los estudios relacionados con los temas abordados en la introducción se encuentra el trabajo de [10] el cual se centra en una variante del RTVRP, que proponen un modelo que permite la colaboración entre camiones y motocicletas para realizar entregas, mediante un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) y un algoritmo de dynamic inertia weight particle swarm optimization (DIWPSO). [11] introducen el Real-Time Collaborative Feeder Vehicle Routing Problem (RTCFVRP) con ventanas de tiempo flexibles, donde se propone un enfoque colaborativo entre múltiples empresas, utilizando una flota heterogénea compuesta por camiones y motocicletas. Los autores proponen un MILP, y una resolución mediante una combinación de algoritmos de Multi-Objetive Particle Swarm Optimization (MOPSO) y MOPSO con Variable Neighborhood Search (MOPSO-VNS). De forma complementaria, [12] presentan el CFVRP with flexible time windows (CFVRPFlexTW), incorporando mecanismos de reabastecimiento dinámico para motocicletas y camiones.

En cuanto a los reabastecimientos en ruta [4], que introducen el FVRP, donde los camiones actúan como depósitos móviles y las motocicletas tienen capacidad limitada. Se cuenta con restricciones de tiempo de servicio, transporte, espera y reabastecimiento. La solución se basa en un algoritmo de ant colony optimization (ACO). En un enfoque similar, [13] proponen el Multi-Fleet FVRP, que bajo las mismas condiciones introduce un modelo MILP y lo resuelve utilizando dos algoritmos: Particle Swarm Optimization (PSO) y una versión híbrida que combina PSO con Simulated Annealing (PSO-SA).

El uso de instalaciones satélite también ha sido objeto de estudio para mejorar la eficiencia de la distribución. En [14], se aborda el Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Backhauls (2E-CVRP-B), en el cual los camiones transportan productos desde un depósito central a depósitos satélite, desde donde vehículos más pequeños completan las entregas a los clientes. A diferencia de los modelos anteriores, este incluye la posibilidad de recoger productos en los puntos de entrega. Para resolverlo, se utiliza un enfoque híbrido que combina Deep Reinforcement Learning (DRL) con Large Neighborhood Search (LNS), denominado RePart-DRL. Asimismo, [9] presentan el Inventory Routing Problem with Satellite Facilities (IRPSF), considerando un sistema de reabastecimiento estocástico desde un proveedor central. Para su resolución se proponen tres heurísticas: una versión aleatorizada del algoritmo de Clarke–Wright, Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) y un enfoque de modified sweep.

II. METODOLOGÍA

A. Descripción del problema

Este trabajo estudia una variante del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) con productos de distintos tiempos de liberación (temprana y tardía), en la que algunos productos no están disponibles al inicio de la jornada. Para evitar retornos al depósito de los vehículos de repartos para realizar la entrega de los productos de liberación tardía, proponemos un esquema de reabastecimiento en ruta: un camión de apoyo parte cuando los productos diferidos se liberan y se reúne con los vehículos de reparto en satélites móviles. Así, la distribución inicial se sincroniza con el reabastecimiento, permitiendo que los vehículos continúen sus rutas sin interrupciones y mejorando la eficiencia logística.

El modelo decide la selección de satélites y la programación de encuentros entre el camión y los vehículos, con el objetivo de minimizar la distancia total recorrida por la flota, sujeto a restricciones de capacidad, sincronización, ventanas de tiempo y tiempos de liberación.

B. Instancias

Las instancias fueron creadas a partir de datos reales, donde se extrajo información como las direcciones aproximadas, cantidad de demanda y tipo de demandas. Para este experimento se utilizaron instancias pequeñas, y la demanda de acuerdo a una distribución empírica, cantidad de vehículos disponibles están de acuerdo a una distibución uniforme discreta, donde el mínimo está en función a la cantidad de demanda y la capacidad de estos, y su máximo es la cantidad mínima multiplicada por 1.5.

C. Formulación Matemática

Los parámetros del modelo son el número de clientes normales (Np), cantidad de clientes con productos de liberación tardía (SDp), cantidad de vehículos de reparto (Kp), con capacidad (Qv), capacidad del camión (Qt), tiempos de servicio (St), tiempo de reabastecimiento (tr), duración de la jornada de trabajo (T), tiempo de liberación (Rt), las distancia entre nodos (Dis_{ij}), tiempos de viaje entre nodos (t_{ij}) y las demandas de los productos ($DemP_{ip}$) por parte del cliente i del tipo p (Np, SDp).

Los conjuntos son el total de nodos (N), que lo componen el conjunto de clientes normales (CP), clientes de productos de liberación tardía (SD) y el depósito central. También se cuenta con conjuntos de clientes normales más depósito (CP0), todos los clientes (TC), conjunto de vehículos (K).

Las variables del modelo son las siguientes:

- $x_{ij} \in \{0,1\}$: 1 si el camión viaja de i a j, con $i,j \in CP0, i \neq j$.
- $y_{ijk} \in \{0,1\}$: 1 si el vehículo k va de i a j, con $i,j \in N, i \neq j$.
- $w_{jk} \in \{0,1\}$: 1 si el vehículo k se reabastece en satélite j.
- $f_{ikp} \geq 0$: carga del producto p que transporta el vehículo k después de visitar i.
- $c_i \geq 0$: tiempo en que el camión atiende al nodo i.
- $a_{ik} \geq 0$: tiempo en que el vehículo k atiende al nodo i.

El modelo también cuenta con restricciones de reabastecimiento, donde se garantiza que solo el punto de recarga puede ser visitado por un vehículo y un camión, y que ese punto solo puede ser cliente CP. En las restricciones de carga, se aseguran que no se excedan las capacidades tanto del camión como de los vehículos y también se garantizan la entrega de los productos según su tipo Pr.

Las restricciones de tiempo garantizan el cumplimiento de los minutos máximo de atención de cada cliente St, la relación

Identify applicable funding agency here. If none, delete this text box.

de precedencia temporal de tiempo de viaje entre nodos de la ruta y el tiempo máximo de ruteo T. Se anexan restricciones de sincronización que coordina los tiempos de llegada a los nodos de reabastecimiento y de tiempo de salida de los productos SDp.

Se diseñaron experimentos computacionales para el modelo y 10 instancias de pruebas fueron programados en AMPL y resuelto con IBM ILOG CPLEX tiempo máximo de 30 minutos. El hardware utilizado es un laptop Intel(R) Core(TM) i5-3317U CPU @ 1.70GHz 1.70 GHz con 8 GB de RAM.

III. Resultados

En conjunto, los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento del modelo propuesto. Se verifica que los vehículos de reparto inician su recorrido únicamente con productos disponibles desde el comienzo de la jornada, y que los clientes con demandas sujetas a tiempos de liberación tardía son atendidos después de que los vehículos han sido reabastecidos por el camión principal. Asimismo, se cumple con las restricciones de capacidad y sincronización establecidas. Estos resultados permiten contar con un punto de referencia confiable para instancias de tamaño reducido, lo que facilita el desarrollo y evaluación de algoritmos heurísticos destinados a resolver instancias de mayor escala.

Agradecimientos

Beca interna de Doctorado, Universidad del Bío-Bío. Proyecto UBIOBIO GI 2380142, ANID FONDECYT REGULAR 1230125.

References

[1] M. S. S. J. Behnamian, “Emerging Research Fields in Vehicle Routing Problem : A Short Review,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 2473–2491, 2023, doi: 10.1007/s11831-022-09874-w.

[2] S. C. Lo and Y. L. Chuang, “Vehicle Routing Optimization with Cross-Docking Based on an Artificial Immune System in Logistics Management,” *Mathematics*, vol. 11, no. 4, 2023, doi: 10.3390/math11040811.

[3] H. Chen, H. Chou, C. Hsueh, and T. Ho, “The Linehaul-Feeder Vehicle Routing Problem,” vol. 8, no. 4, pp. 694–704, 2011, doi: 10.1109/TASE.2011.2142304.

[4] Y. H. Huang, C. A. Blazquez, S. H. Huang, G. Paredes-Belmar, and G. Latorre-Nuñez, “Solving the Feeder Vehicle Routing Problem using ant colony optimization,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 127, no. February 2018, pp. 520–535, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2018.10.037.

[5] V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret, and A. L. Medaglia, “A review of dynamic vehicle routing problems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 225, no. 1, pp. 1–11, 2013, doi: 10.1016/j.ejor.2012.08.015.

[6] F. Cruijssen, “Joint route planning under varying market conditions,” 2007, doi: 10.1108/09600030710752514.

[7] M. Yousefikhoshbakht, M. Chaharmahali, and Z. H. Ahmed, “The Line-Haul Feeder Vehicle Routing Problem: A Classification and Review,” *Complexity*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/9902545.

[8] W. Torres-tapia, J. Montoya-torres, and J. Ruiz-Meza, “Hybrid ILS-VND Algorithm for the Vehicle,” pp. 222–233, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-20611-5_19.

[9] J. F. Bard, L. Huang, P. Jaillet, and M. Dror, “A decomposition approach to the inventory routing problem with satellite facilities,” *Transp. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 189–203, 1998, doi: 10.1287/trsc.32.2.189.

[10] M. Salehi Sarbijan and J. Behnamian, “A mathematical model and metaheuristic approach to solve the real-time feeder vehicle routing problem,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 185, no. October, p. 109684, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109684.

[11] M. Salehi Sarbijan and J. Behnamian, “Real-time collaborative feeder vehicle routing problem with flexible time windows,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 75, no. September, p. 101201, 2022, doi: 10.1016/j.swevo.2022.101201.

[12] M. Salehi Sarbijan and J. Behnamian, *Feeder vehicle routing problem in a collaborative environment using hybrid particle swarm optimization and adaptive learning strategy*, vol. 27, no. 3. Springer Netherlands, 2023. doi: 10.1007/s10668-023-04123-x.

[13] M. Salehi Sarbijan and J. Behnamian, “Multi-fleet feeder vehicle routing problem using hybrid metaheuristic,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 141, no. January, p. 105696, 2022, doi: 10.1016/j.cor.2022.105696.

[14] J. Yang and J. Wang, “A Hybrid Method Combing Reinforcement Learning and Heuristics in Solving Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Backhauls,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 14885 LNAI. pp. 241–253, 2024. doi: 10.1007/978-981-97-5495-3_18.

A mixed-integer linear programming model for the Generalized Clustered Median Tour Problem

Germán Paredes-Belmar
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
german.paredes@pucv.cl

Carlos Obreque
Department of Industrial Engineering
Universidad del Bío-Bío
Concepción
cobreque@ubiobio.cl

Giovanni Campuzano
Department of Maritime and Transport Technology
Delft University of Technology
Delft, The Netherlands
g.f.campuzanoarroyo@tudelft.nl

Pablo A. Miranda-González
Department of Industrial Engineering
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
pablo.miranda@ucn.cl

Gabriel Gutiérrez-Jarpa
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
gabriel.gutierrez@pucv.cl

***Abstract*—This paper addresses a novel variant of the Generalized Traveling Salesman problem (Fischetti et al., 1997) [1] and the Generalized Median Tour Problem, GMTP (Obreque et al., 2020) [2], which is named the Generalized Clustered Median Tour Problem, GCMTP. The GMTP requires finding a primary tour that starts from a depot and visits a set of nodes grouped into disjoint clusters. The primary tour visits at least one node belonging to each cluster. If the primary tour does not visit some nodes within a cluster, those nodes are assigned to the closest node visited by the primary tour. In contrast to the GMTP, the GCMTP considers disjoint clusters that are also subdivided into disjoint subclusters of nodes. The particular characteristics of the GCMTP are: i) a primary tour starting and ending at a depot that visits one node per cluster; ii) within each cluster, a secondary tour is built starting and ending at the visited node by the primary tour; iii) a secondary tour within each cluster that visits all its subclusters; iv) each secondary tour may visit one or more nodes within a subcluster and v) every non-visited node within a subcluster is assigned to a node visited by a secondary tour or the primary tour. In summary, GCMTP is introduced, combining different distribution levels and strategies to address administrative divisions associated with a set of users or beneficiaries spread across a geographical area. A MILP model is developed to solve instances in the Bío-Bío Region, Chile. .**

***Index Terms*—clusters, generalized tour, median tour**

REFERENCES

[1] M. Fischetti, J. J. Salazar González, and P. Toth. A branch-and-cut algorithm for the symmetric generalized traveling salesman problem. *Operations Research*, 45(3):378–394, 1997. https://doi.org/10.1287/opre.45.3.378.

[2] C. Obreque, G. Paredes-Belmar, P. A. Miranda, G. Campuzano, and G. Gutiérrez-Jarpa. The generalized median tour problem: Modeling, solving and an application. *IEEE Access*, 8:178097–178107, 2020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3026933.

This research is supported by FONDECYT 1250605

Evaluación de un enfoque heurístico conjunto para minimizar la tardanza en el ruteo de pedidos en condiciones de congestión implementando simulación

Maria Carolina Mercado-Cabarcas
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Atlántico
Barranquilla, Colombia
mcarolinamercado@ mail.uniatlantico.edu.co

Daniel Mendoza-Casseres
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Atlántico
Barranquilla, Colombia
danielmendoza@mail.uniatlantico.edu.co

Resumen — El presente estudio busca evaluar un enfoque heurístico conjunto que aborde simultáneamente los subproblemas de asignación, secuenciación y ruteo de pedidos en almacenes, bajo condiciones de congestión, utilizando herramientas de simulación. La propuesta surge como resultado de la necesidad de reflejar con mayor precisión la realidad operativa de los sistemas de preparación de pedidos, donde la congestión entre los recolectores afecta negativamente los tiempos de recolección. Para ello, se utiliza el modelo JOBASRP como punto de partida y se propone su adaptación incorporando el análisis de congestión mediante simulación en FlexSim. Esta investigación permite modelar y analizar escenarios con múltiples recolectores interactuando en un entorno de layout con pasillos compartidos, identificando su impacto sobre la tardanza total del proceso. Los resultados preliminares mostraron que el uso de un enfoque basado en fechas de vencimiento, ruteo y el algoritmo VND permitió reducir significativamente la tardanza. En un escenario sin congestión, las mejoras alcanzaron hasta un 62% con dos preparadores y 50% con tres. Estas cifras ofrecen un panorama alentador para comparar con los resultados de esta investigación una vez que se incluyan escenarios de congestión, lo que permitirá validar el enfoque propuesto en condiciones más realistas.

Palabras clave — Ruteo de pedidos, congestión, heurística, simulación, tardanza, logística.

I. INTRODUCIÓN

La preparación de pedidos ha sido identificada durante mucho tiempo como la actividad más intensiva en mano de obra y costosa para casi todos los almacenes [1]. El auge de la práctica del comercio electrónico hace que los almacenes se enfrenten a pedidos cada vez más pequeños que deben ser atendidos cada vez más rápido [2]. En este contexto, el enrutamiento eficiente de recolectores es clave para asegurar entregas a tiempo y optimizar el servicio al cliente.

Diferentes investigaciones han revelado que la congestión en pasillos estrechos o en áreas con alta demanda puede disminuir considerablemente el rendimiento del sistema, aunque haya una cantidad moderada de recolectores. Asimismo, estudios como el realizado por Scholz, A., Schubert, D. y Wäscher, G. (2017).Han subrayado la necesidad de abordar simultáneamente problemas clave como agrupación, asignación, secuenciación y ruteo de pedidos, especialmente cuando existen plazos que cumplir o se busca minimizar retrasos [3].

Considerando estos desafíos en la gestión de almacenes, llevar a cabo este estudio que incluya la congestión en el modelo JOBASRP [3] es muy relevante. La cual permitirá evaluar las mejoras alcanzadas al abordar el proceso de preparación de pedidos con condiciones de congestión mediante un enfoque heurístico conjunto del problema utilizando simulación.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

II. MARCO TEÓRICO

El proceso de preparación de pedidos se inicia con la recepción de órdenes de clientes, las cuales están caracterizadas por una fecha de vencimiento específica que indica el plazo hasta el cual todos los artículos de la orden deben ser recuperados de sus ubicaciones de almacenamiento y llevados al depósito. El incumplimiento de las fechas de vencimiento puede acarrear retrasos en los envíos, lo que resulta en una inaceptable insatisfacción del cliente y altos costos. Además, los envíos que llegan tarde a menudo conllevan multas, por lo cual se busca minimizar la tardanza total del proceso, dando solución simultánea a los problemas de procesamiento, asignación, secuenciación de lotes de pedidos y enrutamiento del selector [3].

La congestión como factor crítico en la preparación de pedidos

Tradicionalmente, la mayoría de los estudios sobre preparación de pedidos se ha enfocado en reducir tiempos y distancias de recorrido, en los últimos años ha cobrado relevancia el análisis de la congestión y el bloqueo entre operarios, ya que estos factores pueden incrementar significativamente los tiempos de picking y afectar la eficiencia global del almacén [4].

Diversos trabajos de investigación han abordado la problemática de la congestión:

- Huber (2011), en su artículo Throughput Analysis of Manual Order Picking Systems with Congestion Consideration, propone modelos analíticos basados en redes de colas cerradas para estimar el rendimiento de sistemas de recolección de pedidos manuales, considerando los efectos de congestión [5].

- Werth, Ullrich & Speckenmeyer, (2011), en Reducing Blocking Effects in Multi-block Layouts, examinaron los efectos del bloqueo en sistemas con múltiples agentes en layouts de bloques múltiples, encontrando que la congestión influye negativamente en el desempeño, especialmente en entornos con alta utilización. Se propone un método heurístico capaz de reducir dichos efectos, logrando recorridos más cortos y eficientes frente a métodos tradicionales [6].

- Bataineh & Khasawneh (2016), en su artículo The Effect of Picking Congestion in Manual Order Picking Environments, profundizaron en cómo la congestión entre recolectores que operan en zonas comunes puede afectar el tiempo de finalización de pedidos. El estudio destaca la necesidad de considerar esta variable en el diseño de rutas óptimas, ya que los modelos que no la contemplan podrían subestimar el tiempo real requerido. Por otro lado también analizaron el impacto de varias políticas de enrutamiento en el proceso de preparación de pedidos en almacenes con múltiples operarios [2].

Enfoques Integrados y el Rol de la Simulación

En contraste con los estudios mencionados, Scholz, Schubert y Wäscher (2017) en su artículo Order Picking with Multiple Pickers and Due Dates – Simultaneous Solution of Order Batching, Batch Assignment and Sequencing, and Picker Routing Problems, propusieron por primera vez un enfoque integrado para resolver de forma simultánea los subproblemas de agrupación de pedidos (order batching), asignación y secuenciación de lotes (batch assignment and sequencing), y el enrutamiento de recolectores (picker routing), todo ello en presencia de fechas de vencimiento [3].

La simulación, con herramientas como Flexsim, emerge como una metodología indispensable para reproducir y analizar escenarios complejos de un sistema [7]. De esta manera, se puede determinar la influencia de la congestión en la asignación y el desarrollo de las rutas de recolección, y mejorar la utilización de los equipos e instalaciones para alcanzar un esquema operativo óptimo [8].

Integración JOBASRP–VND–FlexSim para preparación de pedidos con congestión

El modelo JOBASRP (Joint Order Batching, Assignment, Sequencing and Routing Problem) constituye la base de la investigación, ya que integra en un único marco los subproblemas de agrupación, asignación, secuenciación y ruteo de pedidos [3]. Sin embargo, este modelo no contempla explícitamente la congestión generada por múltiples recolectores en pasillos compartidos.

Para abordar esta limitación, en este estudio se propone una adaptación del JOBASRP en la que la metaheurística Variable Neighborhood Descent (VND) se encarga de generar soluciones iniciales y mejoradas para la asignación y ruteo de pedidos. Estas soluciones se transfieren al entorno de simulación discreta en FlexSim, donde se evalúan bajo condiciones de congestión. De este modo, FlexSim actúa como un evaluador del desempeño realista de las rutas propuestas por VND, considerando bloqueos, interferencias y tiempos adicionales derivados de la interacción entre recolectores.

Este esquema de integración permite combinar la capacidad exploratoria de las metaheurísticas con la fidelidad de la simulación, ofreciendo un marco robusto para analizar la tardanza total en escenarios de preparación de pedidos con congestión.

III. METODOLOGIA

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo con modelado en ambiente simulado. Se parte del modelo JOBASRP, adaptado mediante la metaheurística Variable Neighborhood Descent (VND) para generar soluciones de asignación y ruteo bajo condiciones de congestión. El almacén fue representado en FlexSim, donde se programó el layout con dos bloques, cinco

pasillos de selección, tres transversales y un depósito frontal izquierdo, incorporando parámetros de operación y restricciones derivadas de la interacción entre múltiples recolectores. El sistema simula diferentes escenarios de congestión en el ruteo, permitiendo evaluar medidas de desempeño como la tardanza total, los tiempos de recorrido y la eficiencia en la utilización de recursos, con el fin de analizar la efectividad del enfoque propuesto frente a la línea base sin congestión.

IV. CONCLUSIÓN

El enfoque propuesto representa un avance importante en el estudio del ruteo de pedidos, ya que trata simultáneamente los subproblemas de la preparación de pedidos y, a diferencia de estudios anteriores, incluye un análisis de la congestión en el ruteo. La simulación permite reflejar de manera más precisa la realidad de un almacén con varios recolectores, validando así la efectividad del modelo en situaciones reales. Se espera que los resultados obtenidos en esta investigación confirmen que la congestión se puede gestionar eficazmente mediante una combinación de técnicas heurísticas y simulación, lo que contribuirá a minimizar la tardanza y a mejorar el desempeño logístico general.

REFERENCIAS

[1] De Koster, R., Le-Duc, T. y Roodbergen, K. J. (2007). *Design and control of warehouse order picking: A literature review*. European Journal of Operational Research, 182(2), 481–501. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009

[2] Bataineh, O. y Khasawneh, M. (2016). *The Effect of Picking Congestion in Manual Order Picking Environments*. https://www.academia.edu/29219707/The_Effect_of_Picking_Congestion_in_Manual_Order_Picking_Environments.

[3] Scholz, A., Schubert, D., & Wäscher, G. (2017). Order picking with multiple pickers and due dates – Simultaneous solution of order batching, batch assignment and sequencing, and picker routing problems. *European Journal of Operational Research, 263*(2), 461–478. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.038.

[4] Casella, G., Volpi, A., Montanari, R., Tebaldi, L. y Bottani, E. (2023). *Trends in order picking: a 2007–2022 review of the literature*. Production & Manufacturing Research, 11(1). https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2191115.

[5] Huber, C. (2011). *Throughput Analysis of Manual Order Picking Systems with Congestion Consideration*.K. Elissa, “Title of paper if known,” unpublished.

[6] Werth, F., Ullrich, O. y Speckenmeyer, E. (2011). *Reducing blocking effects in multi-block layouts*. https://www.researchgate.net/publication/301891561_Reducing_blocking_effects_in_multi-block_layouts

[7] Wang, K. y Wang, X. (2014, mayo). *Simulation optimization research on logistics distribution center picking operation*. En Proceedings of the International Conference on Logistics, Engineering, Management and Computer Science (pp. 1202–1205). Atlantis Press. https://www.atlantis-press.com/article/13172.

[8] Jiang, R., Ge, L. y Liu, T. (2015). *Optimization of distribution centers based on Flexsim*. En ICTE 2015 (pp. 709–716). American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784479384.091.

Automatic Generation of Metaheuristic Algorithms for the Pollution Traveling Salesman Problem

José Luis Erices Vera
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción
Concepción, Chile
jerices2022@udec.cl

Carlos Contreras-Bolton
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción
Concepción, Chile
carlos.contreras.b@udec.cl

***Abstract*—The Pollution Traveling Salesman Problem (PTSP) extends the classical Traveling Salesman Problem (TSP) by incorporating environmental and operational cost components into the objective function. The PTSP aims to determine a minimum-cost Hamiltonian tour that starts and ends at a central depot, visiting each customer exactly once, while minimizing a cost function that accounts for both driver wages and fuel consumption. Fuel consumption depends not only on travel distance but also on vehicle load and speed, which varies across arcs [1]. This results in a more realistic and complex formulation that better reflects the challenges encountered in sustainable logistics and vehicle routing [4].**

This research proposes a framework for the automatic design and tuning of metaheuristic algorithms specifically tailored for the PTSP. The approach is based on the modular construction of algorithms using low-level search components such as local search operators, perturbation mechanisms, initial solution constructors, and acceptance criteria. These components are orchestrated within classical metaheuristic structures, including Iterated Local Search (ILS), Variable Neighborhood Search (VNS), Simulated Annealing (SA), Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP), and Tabu Search (TS) [2], [5]. All components have been adapted to the PTSP's specific cost structure, which incorporates arc-dependent fuel consumption based on speed, load, and distance [1].

The current development includes multiple local search operators (e.g., 2-opt variants and swap moves), each implemented in three versions: first-improvement acceptance, best improvement with respect to the original route, and globally best improvement [5]. These variations provide a flexible balance between search intensity and computational efficiency. Additionally, five types of perturbation strategies have been designed, including one that modifies the depot position, thereby affecting all downstream flows and route costs. A key feature of the framework is the use of precomputed optimal speeds for each arc, which significantly reduces the computational burden during evaluation and enables the algorithms to efficiently scale to larger instances [1]. Furthermore, a constructive heuristic inspired by the nearest neighbor approach is being developed and tailored for the PTSP. The design emphasizes a high degree of parameterization to introduce controlled randomness, thereby enabling the generation of diverse and tunable initial solutions.

Although results are still under development, the framework is being tested on a wide set of benchmark instances ranging from 10 to 200 customers. Preliminary observations suggest that the proposed approach is capable of generating high-quality solutions within short execution times, making it suitable for time-sensitive applications such as urban logistics and green routing [4]. Future work includes the integration of automated configuration tools such as irace to explore and identify the most effective combinations of components and parameter values [3]. This data-driven tuning phase is expected to further enhance the quality and robustness of the algorithms across diverse instance types [2].

This research makes significant contributions to the emerging field of sustainable transportation optimization by proposing an innovative methodological framework for the PTSP. Our approach addresses two critical challenges in contemporary green logistics: computational scalability and quantifiable integration of environmental variables. By combining intelligent precomputation techniques with modular metaheuristics, the framework overcomes the limitations of traditional methods that fail to account for the dynamic interdependence between load, speed, and fuel consumption [1].

The practical implications of this work are particularly relevant for today's logistics sector, which faces increasing regulatory pressures and sustainability demands. Our model's ability to generate optimal solutions while simultaneously considering operational costs and emissions makes it a valuable tool for urban planners and logistics operators [4]. This is especially true in last-mile and urban freight distribution contexts, where environmental restrictions are becoming increasingly stringent.

From a theoretical perspective, this research opens new avenues for exploration in combinatorial optimization. The system's modular architecture allows natural extensions to more complex problems such as variants with time windows, heterogeneous fleets, or multiple depots [2]. Furthermore, the speed precomputation component sets an important precedent for handling nonlinear cost functions in routing problems [1].

This research was supported by Fondecyt Iniciación Project No. 11241132.

REFERENCES

[1] V. Cacchiani et al., "The Pollution-Routing Problem: The Effect of Different Speed and Load-Dependent Fuel Consumption Models," *International Transactions in Operational Research*, vol. 30, pp. 655–687, 2023.

[2] M. Birattari et al., "Automated algorithm configuration and parameter tuning," in *Handbook of Metaheuristics*, Springer, 2019, pp. 587–609.

[3] M. López-Ibáñez et al., "The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration," *Operations Research Perspectives*, vol. 3, pp. 43–58, 2016.

[4] E. Demir, T. Bektaş, and G. Laporte, "A review of recent research on green road freight transportation," *European Journal of Operational Research*, vol. 237, no. 3, pp. 775–793, 2014.

[5] Santini, A., Ropke, S. Hvattum, L.M. A comparison of acceptance criteria for the adaptive large neighbourhood search metaheuristic. J Heuristics 24, 783–815 (2018). https://doi.org/10.1007/s10732-018-9377-x

Session N°8 – Track N°4

OR Applications and Simulation

Chair: Pradenas, L. *(Universidad de Concepción)*
Place: X-103
Time: 15:30 – 16:45

Optimización de Procesos Productivos Mediante Simulación Estocástica con FlexSim y OptQuest: Caso Aplicado en la Fabricación de Pasillos Metálicos en ScaleAQ Chile

Time: 15:30 – 15:45
Authors:

- Slater-Menanteau, K. *(Universidad Austral de Chile)*
- González-Marín, M. *(Universidad Austral de Chile)*
- Miranda-Torres, R. *(Universidad Austral de Chile)*
- Sepulveda-Hernández, E. *(ScaleAQ)*

Simulations of Chilean Wildfires using Cellular Automata

Time: 15:50 – 16:05
Authors:

- Salussolia, G. *(Universidad Mayor)*
- Jiménez, D. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Cho, A. *(Universidad Mayor)*
- Lazcano, V. *(Universidad Mayor)*

Estimación de Impacto en Salud del "Bolsillo Saludable" en Chile, Utilizando DYNAMO-HIA

Time: 16:10 – 16:25
Authors:

- Garmendia, M. *(Universidad de Chile)*
- Guzmán, J. *(Universidad de Chile)*
- Mondschein-Prieto, S. *(Universidad de Chile)*

Comparación de un Modelo y Metaheurísticas para la Selección y Programación de Proyectos de Investigación en la Antártica

Time: 16:30 – 16:45
Authors:

- Vega-Hidalgo, M. *(Universidad de Concepción)*
- Pradenas, L. *(Universidad de Concepción)*
- Parada, V. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Optimización de procesos productivos mediante simulación estocástica con FlexSim y OptQuest: caso aplicado en la fabricación de pasillos metálicos en ScaleAQ Chile

Slater M., Kenneth
Ingeniería Civil Industrial
Universidad Austral de Chile
Puerto Montt, Chile
kenneth.slater@alumnos.uach.cl

González M., Marcos
Instituto Gestión e Industrias
Universidad Austral de Chile
Puerto Montt, Chile
marcos.gonzalez@uach.cl

Miranda T., Richard
Instituto de Gestión e Industrias
Universidad Austral de Chile
Puerto Montt, Chile
richard.miranda@uach.cl

Sepulveda H., Eduardo
D*epto. Producción*
ScaleAQ
Puerto Varas, Chile
eduardo.sepulveda@scaleaq.com

***Abstract*— Este artículo muestra el desarrollo un modelo de simulación estocástica por eventos discretos basado en la metodología de Banks [4] enfocado en la producción de pasillos metálicos de ScaleAQ Chile. La optimización de este modelo de simulación se realizó mediante el módulo OptQuest de Flexsim, generando escenarios alternativos mediante algoritmos metaheurísticos bajo restricciones y función objetivo definidas. El escenario óptimo obtenido sugirió una redistribución específica de estaciones de trabajo, logrando una mejora del 7,74 %, sin modificar la superficie ni alterar la distribución de planta (l*ayout*) actual. Finalmente, se analiza la relevancia del uso de la herramienta OptQuest frente al diseño metodológico de simulación tradicional, destacando su capacidad para potenciar y optimizar significativamente las etapas definidas por Banks, por medio de algoritmos metaheurísticos que permiten definir múltiples escenarios de mejora de manera eficiente y eficaz, consolidándose como una herramienta robusta y estratégica para la optimización continua en contextos productivos complejos.**

Palabras clave—Simulación por eventos discretos, FlexSim, OptQuest, optimización de procesos, procesos industriales.

I. INTRODUCCIÓN

ScaleAQ es un proveedor mundial de soluciones tecnológicas y estructurales para la industria acuícola, que en Chile, es el segundo productor a nivel mundial, el cual concentra aproximadamente el 35% del mercado de jaulas metálicas marinas producidas en su planta de Puerto Varas [1]. El estudio se enfoca en la fabricación de pasarelas metálicas, utilizadas para la construcción y tránsito de operarios en los centros de cultivo , denominados de forma técnica como PDA, cuyas etapas críticas incluyen el dimensionado de materia prima, pre-ensamblaje de estructura, soldadura de estructura y limpieza de estructura. El espacio destinado a la elaboración de PDA es de 60 metros de largo por 20 metros de ancho y 12 metros de alto (Anexo A). En la actualidad la empresa experimenta retrasos en la etapa de soldadura, específicamente en subproceso remate de estructura, lo que restringe el *throughput* global, concentrando un 43% de tiempo de ciclo respecto a la totalidad del proceso productivo, seguido por otro subproceso que concentra tan solo el 23,97%

FlexSim, un software de simulación discreta surge como una solución para la optimización del proceso productivo de pasillos PDA, ya que permite analizar sistemas complejos mediante la experimentación virtual, reduciendo de manera significativa los costos y los riesgos asociados a ajustes operativos en la planta sin una simulación de rendimiento previa [2]. FlexSim se define como un software de simulación de eventos discretos capaz de reproducir con precisión las operaciones de un sistema al modelar su variabilidad, los comportamientos dependientes del tiempo y las restricciones espaciales [3]. A su vez, Flexsim proporciona Optquest, el cual sirve como remplazo de los métodos tradicionales de optimización y diseño de mejoras productivas dado que automatiza la búsqueda de configuraciones óptimas del sistema mediante algoritmos metaheurísticos, permitiendo evaluar de forma eficiente grandes volúmenes de combinaciones posibles de variables de entrada [4].

Por medio del uso de Flexsim y Optquest se tiene como objetivo responder a la pregunta de investigación que guía este trabajo: ¿Cómo reducir el tiempo de ciclo de la etapa de remate sin ampliar el layout existente ni incrementar la superficie de trabajo? Por medio de los resultados, se buscó demostrar la efectividad de OptQuest como herramienta de optimización de un modelo de simulación por sobre la creación de escenarios creados por el usuario.

II. METODOLOGÍA

Según lo propuesto por Banks [4], el proceso de simulación de procesos está compuesto por doce pasos (Anexo B), los cuales se explican de manera general a continuación.

A. Etapas para la simulación de procesos

Inicialmente se encuentra la formulación del problema, necesaria para orientar el alcance y objetivos del estudio, así como el plan de trabajo entre el analista y los responsables del proceso productivo. A continuación, se formulan las preguntas de investigación que deben ser respondidas al final del proyecto. Posteriormente, se realiza la recolección de información y la conceptualización del modelo, donde existe

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

una interacción constante entre ambas partes, por un lado obteniendo información representativa del sistema (recolección de dato en terreno y entrevistas) y en segundo construyendo un modelo que potencie la calidad de los datos recopilados. La cantidad de muestras representativas a recopilar fue dada por la Norma Chilena Oficial NCh 43. Una vez construido el modelo de simulación, se procede a la verificación y validación. La verificación está enfocada en garantizar que los parámetros de entrada y la estructura lógica estén representados correctamente, sin errores de computación. Por otro lado, la validación se realiza mediante un proceso iterativo de comparación (test estadísticos) entre el comportamiento del sistema computacional y el real, asegurando que el modelo pueda replicar adecuadamente la realidad. Por último, respecto a la simulación, se continua con los diseños experimentales, donde se crea una serie de escenarios alternativos para luego evaluar si presentan mejoras a comparación del escenario actual, logrando responder las preguntas formuladas al comienzo.

Para que los resultados del modelo sean representativos según la aleatoriedad y desviación estándar del sistema, se calculó la cantidad mínima de réplicas a simular mediante la ecuación (1), fórmula para el tamaño mínimo de muestra detallada en [6].

$$N \geq \left(\frac{t_{n-1,1-\frac{\alpha}{2}} * S(n)}{E} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:
$t_{n-1,1-\frac{\alpha}{2}}$ = valor crítico de la distribución t con n−1 grados de libertad.
S(n) = desviación estándar muestral.
E = margen de error tolerado.

B. *Optquest como Sustituto de Formulación de Escenarios Alternativos*

El presente estudio adopta el marco metodológico propuesto, sustituyendo la fase tradicional de diseño experimental por la implementación de OptQuest, módulo de optimización integrado en FlexSim V25.0.4. Esta herramienta permite la construcción automatizada de escenarios óptimos mediante el uso de algoritmos metaheurísticos avanzados, los cuales exploran de forma eficiente el espacio de soluciones para identificar combinaciones de variables de entrada que optimicen funciones objetivo previamente definidas [3] [4].

Para su implementación, OptQuest requiere la formulación explícita de una función objetivo, la cual puede estar orientada a la maximización o minimización de una o más métricas de desempeño del sistema simulado (por ejemplo, tiempo de ciclo, nivel de utilización o *throughput*). Asimismo, el proceso de optimización está sujeto a un conjunto de restricciones que limitan el dominio de búsqueda, las cuales son construidas a partir de los parámetros operacionales del sistema, incluyendo capacidades físicas, recursos disponibles y políticas internas de funcionamiento.

III. RESULTADOS

Se presentan los resultados, organizados según las etapas de trabajo, que muestra la secuencia lógica desde la formulación del problema hasta la obtención de la solución óptima.

A. *Formulación del Problema y Pregunta a Responder*

Luego de la identificación del proceso y desarrollo de entrevistas a los responsables del proceso productivo, se desarrolló el diagrama de proceso (Anexo C). Posterior a ello, por medio de análisis de información recopilada, entrevistas, observación directa y toma de muestras, se concluyó que el subproceso remate de estructura es considerado recurso restringido (cuello de botella). Por otro lado, se determinó que la zona de producción presenta limitaciones físicas de espacio, imposibilitando la capacidad de agregar más estaciones de trabajo. En función a la problemática, tal como se señala en la metodología, se plantea el de desafío de reducir el tiempo de ciclo del modelo PDA sin incrementar la superficie de trabajo.

B. *Recolección de Información y Conceptualización del Modelo*

Se establecieron muestras para todos los subprocesos vinculados a la elaboración del producto final. La creación del modelo de simulación involucró el modelado del sistema, incorporando secuencia de subprocesos, capacidad de procesamiento y almacenamiento por estación de trabajo, horario laboral, planificación de requerimiento de materiales y tiempos de producción. Además, se establecieron etiquetas y códigos de programación, tal como se establece en la etapa de traducción del modelo en metodología de Banks [4].

Los tiempos de producción de cada subproceso se ajustaron a una distribución estadística por medio del módulo “Fitted Distribution” de Flexsim y prueba de bondad de ajuste de Anderson Darling utilizando el software Minitab V22.1. Respecto a las métricas de rendimiento, se establecieron indicadores de tiempo de ciclo del proceso completo y por subproceso, además de la tasa de producción por réplica del modelo. Los datos utilizados en este estudio estas disponibles previo a solicitud y con restricciones de confidencialidad debido a la relevancia estratégica de ScaleAQ.

C. *Verificación y Validación*

Esta actividad se realizó a medida que se iba desarrollando el modelo, permitiendo verificar su funcionamiento, de tal manera de evitar errores, lo que incluyó la revisión de la configuración general del modelo, variables internas y líneas de código.

La validación del modelo creado se realizó mediante la comparación de las medias de tiempos de ciclos del modelo ($\mu 1$) versus tiempos de ciclo de la situación real ($\mu 2$), utilizando el software Minitab.

$$\textit{hipótesis nula} \quad H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$
$$\textit{hipótesis alterna} \quad H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Donde:
μ_1= Media de 10 lotes de muestra del modelo de simulación
μ_2=Media de seis lotes de muestra del proceso productivo real

Los resultados de la comparación de medias indican igualdad entre estas, lo que implica que el modelo es representativo (t-test, p=0,085).

Para finalizar la construcción del modelo, la cantidad de réplicas representativas para la obtención de resultados calculado por medio de la ecuación (1) resultó en un mínimo de 20 réplicas, donde se considera que cada una de ellas corresponde a 27 jornadas laborales de ocho horas.

D. Optimización mediante OptQuest

Las variables definidas para la configuración de OptQuest fueron:

SB_i = Número de estaciones de trabajo en el subproceso i (i = 1, 2, 3)
P = Productividad por réplica

La función objetivo (F.O) definida en OptQuest fue:

F.O Maximizar P

Restricciones:

$$SB_i \geq 2 \ \forall \ i = \{1,2,3\}$$

$$\sum_{i=1}^{3} SB_i \leq 11 \ \forall \ i = \{1,2,3\}$$

La función objetivo se definió para maximizar las unidades producidas por réplica de simulación, en función de las estaciones de trabajo asignadas a cada subproceso. La productividad se midió como la cantidad de pasillos fabricados por réplica, definida como 27 jornadas de operación. La situación actual del proceso productivo corresponde a una configuración de SB_1= 3, SB_2= 2 y SB_3= 2, con P = 89,85 unidades/réplica o 3,33 unidades/jornada. OptQuest proporcionó una serie de escenarios de mejora comparados al escenario actual (Tabla 1).

TABLE I. TABLA I. ESCENARIOS PROPUESTOS POR OPTQUEST

Escenario	SB_1	SB_2	SB_3	P	% mejora
Escenario actual	3	2	2	89,85	-
1	6	2	2	95,91	6,06%
2	5	2	2	94,72	4,72%
3	5	2	3	94,32	4,30%
4	5	3	2	94,28	4,26%
5	4	3	3	92,99	2,83%

Como se observa en la Tabla 1, la mejora más significativa corresponde al escenario uno, con un aumento del 6,06% en la cantidad de unidades producidas por réplica, lo que implica seis unidades más cada 27 jornadas laborales completas. En análisis de los resultados proporcionados, SB_1 debe incrementar en dos estaciones de trabajo para que la tasa de producción aumente un 4,26% como mínimo, sin existir diferencias significativas al modificar SB_2 y SB_3.

IV. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

La validación del modelo mediante la prueba de hipótesis para la media permitió constatar que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados del modelo simulado y el comportamiento real del proceso (p = 0,085), lo cual respalda la representatividad del modelo desarrollado. Este resultado garantiza una evaluación confiable de escenarios alternativos sin necesidad de intervenir el sistema real del entorno productivo de ScaleAQ Chile.

Repecto a los escenarios generados mediante la herramienta OptQuest, la solución óptima propuesta por el modelo, correspondiente al escenario uno, sugiere una redistribución de estaciones de trabajo que permite aumentar el rendimiento del sistema en un 6,06%, sin modificar la superficie disponible ni intervenir el *layout* productivo. Esta mejora implica una ganancia acumulativa de seis unidades adicionales cada 27 jornadas laborales completas, lo que representa un avance significativo en el aprovechamiento de la capacidad instalada. No obstante, se identificó que para obtener beneficios sobre el rendimiento total es necesario incrementar solo una estación de trabajo.

Desde una perspectiva metodológica, la integración de optimizador de escenarios simulados en el diseño metodológico tradicional se posiciona como una evolución dentro del ámbito de la simulación estocástica aplicada. El uso de algoritmos metaheurísticos permitió explorar de forma automatizada y eficiente un amplio conjunto de configuraciones posibles, reduciendo los tiempos de análisis, principalmente en modelos de altamente complejos, y disminuyendo la probabilidad de sesgos derivados del juicio del analista, consolidando esta metodología como una herramienta de apoyo estratégico para la planificación operativa y la mejora continua en contextos de alta variabilidad y restricciones operacionales.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la imposibilidad de modelar con precisión el comportamiento de los operarios, lo que se podría resolver desarrollando un modelo de simulación con agentes. Asimismo, el modelo se construyó en base a un único producto, por lo que su aplicabilidad en contextos multi producto requiere nuevas adaptaciones. Se propone como línea futura de trabajo el desarrollo de un modelo multiobjetivo que incorpore variables económicas, tales como costos por hora y disponibilidad de recursos, con el objetivo de optimizar simultáneamente el desempeño operativo y financiero del sistema productivo.

REFERENCIAS

[1] ScaleAQ, *ScaleAQ Integrated Annual Report 2024*, p. 12, 2024.

[2] J. C. Puche Regaliza, J. Costas Gual y P. Arranz Val, *Simulación como herramienta de ayuda para la toma de decisiones empresariales. Un caso práctico*, Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, vol. 21, pp. 190, 2016.

[3] FlexSim, "FlexSim simulation software," FlexSim, [Online].

[4] OptTek Systems, "OptQuest," OptTek, [Online]. Available: https://www.opttek.com/products/optquest/.

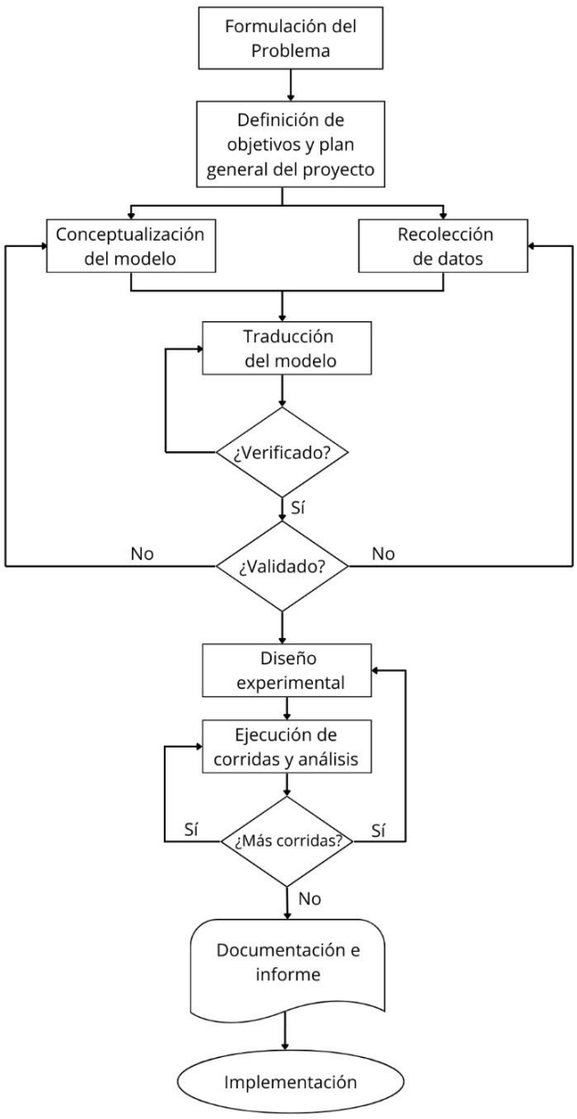
[5] J. Banks, J. S. Carson II, B. L. Nelson y D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010, pp. 11–15.

[6] J. H. Zar, *Biostatistical Analysis*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010, pp. 86–89

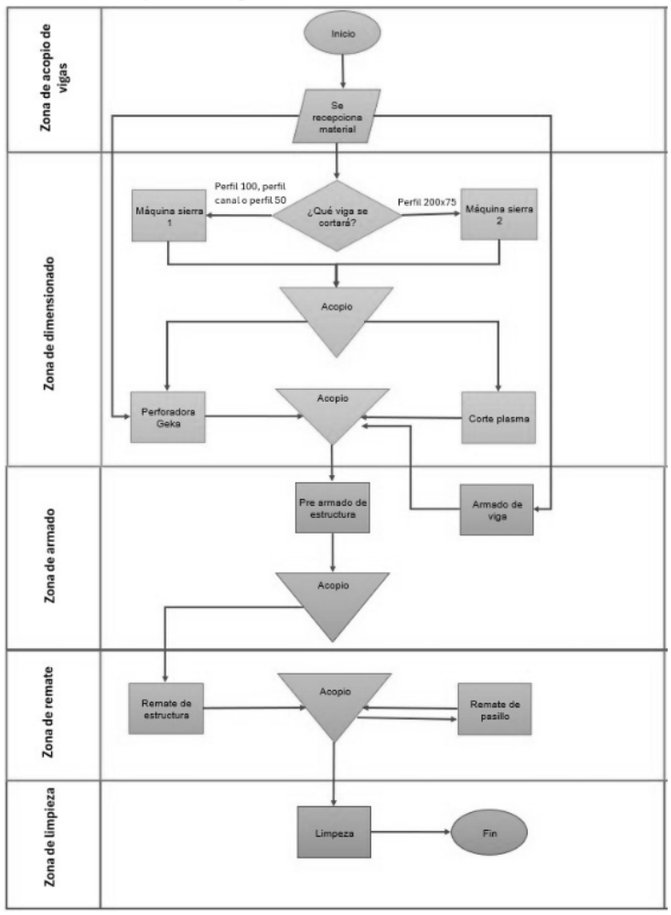
[7] M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.

ANEXOS

Anexo A: Metodología de simulación planteada por Banks [5].



Anexo B: Diagrama de proceso de PDA.



Simulations of Chilean wildfires using cellular automata

Giulia Salussolia
School of Engineering
Universidad Mayor
Santiago, Chile
giulia.salussolia@umayor.cl

Dora Jiménez
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
dora.jimenez.a@edu.uai.cl

Anthony D. Cho
School of Engineering
Universidad Mayor
Santiago, Chile
anthony.cho@umayor.cl

Vanel Lazcano
School of Engineering
Universidad Mayor
Santiago, Chile
vanel.lazcano@umayor.cl

Predicting how a wildfire will spread is one of the most critical - and challenging - tasks in risk management. Rapid changes in wind conditions, fuel heterogeneity, and complex terrain make real-time forecasting difficult, especially in scenarios like Chile's recent megafires. In this work, we present a stochastic cellular automata model designed to simulate wildfire propagation in Chile. The approach discretizes the landscape into a two-dimensional grid that incorporates real data on vegetation and wind, using the 2024 Valparaíso megafire as a case study. Each cell evolves through three states (unburnt, burning, or burnt), with transitions governed by probabilistic rules that consider vegetation type, wind direction and intensity, and dynamic neighborhood structures (Moore and von Neumann). The model adapts the neighborhood size based on wind strength, allowing the simulation of both adjacent and non-adjacent spread under extreme conditions. This balance between computational simplicity and realistic fire behavior enables rapid adaptation to local scenarios while maintaining predictive capability. Our framework contributes to the development of accessible tools for wildfire risk management, combining technical efficiency with the flexibility to integrate real-time environmental data for faster, informed decision-making.

Estimación de impacto en salud del “Bolsillo Saludable” en Chile, utilizando DYNAMO-HIA

Garmendia, María Luisa
CIAPEC, Imstituto de Nutrición y Tecnología de Alimentos
Universidad de Chile
Santiago, Chile
mgarmendia@inta.uchile.cl

Guzmán, José
dept. Ingeniería Civil Industrial
Universidad de Chile
Santiago, Chile
jose.guzman.1@ug.uchile.cl

Mondschein, Susana
dept. Ingeniería Civil Industrial
Universidad de Chile
Santiago, Chile
susana.mondschein@uchile.cl

Keywords— subsidio alimentario, modelo de simulación, consumo de frutas y verduras, DYNAMO-HIA, Chile.

I. Introducción

Los malos hábitos alimenticios —como el consumo excesivo de calorías, bebidas azucaradas, alimentos ultra procesados (AUP) y sodio, junto con el bajo consumo de frutas y verduras (FV)— representan un grave problema de salud pública, ya que están asociados al aumento en la incidencia y prevalencia de enfermedades no transmisibles (ENT), tales como las enfermedades cardiovasculares, la diabetes tipo 2 o el cáncer [1–4].

En el caso de Chile, el 85% de las muertes registradas en 2019 fueron atribuibles a ENT [1]. Paralelamente, se ha observado un aumento significativo en las tasas de obesidad: el 33,4% de la población presenta algún grado de obesidad, cifra que se eleva al 46,6% en el caso de los niños menores de 8 años [5]. Este fenómeno se relaciona, en parte, con los patrones alimentarios predominantes en el país, caracterizados por un bajo consumo de FV y un alto consumo de sal, bebidas azucaradas y AUP [5–8].

Con el propósito de abordar los problemas dietéticos y fomentar el consumo de alimentos saludables, el CIAPEC del Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos (INTA) desarrolló el piloto “Bolsillo Saludable”, el cual consiste en la entrega de un subsidio económico a familias de bajos ingresos destinado exclusivamente a la compra de FV en ferias libres.

Este piloto se implementó durante los meses de julio y agosto de 2024, las cuales fueron positivas en las 30 familias evaluadas. Sin embargo, es necesario contar con información del impacto en salud que tendría el “Bolsillo Saludable” de implementarse a nivel poblacional.

II. Objetivo

Estimar y analizar el impacto potencial en salud (sobre obesidad y ENT) del programa “Bolsillo Saludable”, una política pública que consiste en la entrega de un subsidio económico destinado exclusivamente a la compra de FV en ferias libres, mediante un modelo de simulación a diez años.

III. Metodología

DYNAMO-HIA

Para la evaluación del impacto de la política “Bolsillo Saludable” se empleará el modelo DYNAMO-HIA (https://www.dynamo-hia.eu/en), que es un modelo o cadena de Markov desarrollado en los Países Bajos [9]. Este modelo combina microsimulación de factores de riesgo con macrosimulación de enfermedades y supervivencia poblacional, lo que permite estimar la evolución del estado de salud a lo largo del tiempo. DYNAMO-HIA ha sido utilizado en diversos países como herramienta de apoyo para la evaluación de políticas públicas.

El funcionamiento del modelo se basa en la comparación de un escenario de referencia con distintos escenarios de intervención, en los cuales varían la prevalencia, las probabilidades de transición de los factores de riesgo, o ambas. Para su correcta implementación, DYNAMO-HIA requiere datos epidemiológicos organizados en tres directorios principales: población, enfermedades y factores de riesgo, todos desagregados por edad y sexo.

El modelo ha sido objeto de procesos de validación [10], y su funcionamiento ha sido descrito en detalle por Boshuizen [9]

Escenarios

En el presente estudio, aún en desarrollo, se considerarán tres tipos de escenarios: (i) el escenario de referencia, donde no existe intervención; (ii) un escenario ideal, donde el 40% más vulnerable de la población alcanza el consumo recomendado de cinco porciones diarias, lo que permitiría estimar el máximo efecto que podría alcanzar “Bolsillo Saludable”; (iii) un conjunto de escenarios intermedios que considera tanto el aumento en el consumo (FV) como el nivel de recepción de la propuesta, entendida esta última como el porcentaje de la población que modifica su consumo tras recibir el beneficio (por ejemplo, un escenario intermedio en el que se incrementa en una porción diaria el consumo de FV y se alcanza un 80% de recepción).

Para estimar los cambios en el consumo atribuibles a “Bolsillo Saludable”, se utilizaron como referencia los resultados del piloto. Si bien este tuvo como objetivo principal evaluar la aceptación y el uso del subsidio por parte de la población, también permitió observar el efecto en las compras de FV. Estos resultados se pude observar en la tabla 1.

Compras semanales de FV en kg (n=30)	Antes del piloto [SD]	Después del piloto [SD]
Frutas	5,38 [3,96]	8,29 [4,52]
Verduras	4,71 [3,28]	5,27 [2,95]
Total (Frutas + Verduras)	10,09	13,56

Tabla 1: Promedio de compras semanales de FV

Aunque los resultados no alcanzaron significancia estadística, principalmente debido al reducido número de encuestados (30 personas), los datos disponibles sugieren un aumento en las compras de (FV) asociado a la implementación de "Bolsillo Saludable". Esta información fue utilizada como referencia para estimar el potencial incremento en el consumo de FV. Para este cálculo se consideró que la semana comprende siete días, que el promedio de integrantes por hogar entre los encuestados era de cuatro personas, y que, de acuerdo con la definición de la OMS, una porción de FV corresponde a 80 gramos. Bajo estos supuestos, se obtuvo el siguiente resultado:

Aumento de consumo diario potencial por individuo	gramos	Porciones (80 gr por porción)
Frutas	104	1,3
Verduras	20	0,25
Frutas + Verduras	124	1,55

Tabla 2: Aumento potencial de consumo diario por individuo

Dado lo anterior, en los escenarios intermedios se contemplarán aumentos de 0,5; 1; 1,5 y, adicionalmente, un caso optimista de 2 porciones de (FV), mientras que los porcentajes de recepción variarán entre un 10% y un 90%, avanzando en intervalos de 10 puntos porcentuales.

Efectos en salud

Las ENT consideradas para el estudio son: diabetes tipo 2, accidente cerebrovascular, cáncer colorrectal e infarto agudo al miocardio (IAM); adicionalmente, se evalúa el efecto del proyecto sobre la prevalencia de obesidad.

Consumo de FV

El factor de riesgo se definió como el número de porciones diarias de FV consumidas, considerando cada porción equivalente a 80 gramos. Las prevalencias de consumo se obtuvieron a partir de la Encuesta Nacional de Salud 2016-2017 publicada por el Departamento de Epidemiología del Ministerio de Salud de Chile. Para estimar las probabilidades de transición, se utilizó un método planteado por DYNAMO-HIA que aplica la lógica de un modelo de transporte [11], el cual consiste en utilizar la desagregación etaria de las prevalencias para calcular el porcentaje mínimo de individuos que deben cambiar de estado para mantener la consistencia en la prevalencia entre grupos etarios consecutivos.

Con respecto a los escenarios, para el caso ideal se asumió que el 40% de la población cumple con la recomendación de cinco porciones diarias sin cambiar de estados, mientras que el resto mantiene la misma dinámica del escenario de referencia. En contraste, los escenarios intermedios se modelaron como cambios en las probabilidades de transición, obtenidos al ajustar las prevalencias según cada combinación planteada y resolviendo nuevamente el problema de transporte con estos valores actualizados.

Recopilación de datos

Corresponde a la etapa actual del proyecto. Las principales fuentes consideradas incluyen el Censo 2024 [12], para la caracterización de la población, y las encuestas y estudios publicados por el Departamento de Epidemiología del Ministerio de Salud de Chile [13-14], para información sobre enfermedades y el factor de riesgo. En caso de ser necesario, para parámetros de mayor complejidad, como los riesgos relativos, se recurrirán a metaanálisis internacionales. En aquellos casos en que no existen datos de incidencia disponibles en publicaciones oficiales, la información será estimada mediante un problema de transporte similar las transiciones del factor de riesgo.

IV. Avances y Conclusiones preliminares

Debido a que aún no se dispone de la totalidad de los datos necesarios para las simulaciones, los resultados obtenidos hasta el momento han sido limitados. Sin embargo, con el fin de probar la funcionalidad del programa y verificar su precisión, se realizaron ejercicios preliminares, destacando la simulación del primer año de la pandemia de COVID-19 en Chile.

El caso del COVID-19 fue seleccionado debido a la disponibilidad de datos. La simulación se restringió al primer año porque en los periodos posteriores se introdujeron diversos tratamientos que no podrían reflejarse adecuadamente sin una recopilación de información más exhaustiva. A ello se suma que el COVID-19 no es una enfermedad crónica, como las ENT, que son el tipo de enfermedades en que se enfoca DYNAMO-HIA, lo que implica que una persona podría enfermarse más de una vez y alterar los resultados de simulaciones multianuales. Cabe señalar que, junto con este ejercicio, también se desarrollaron otras simulaciones de prueba orientadas a evaluar la facilidad de uso y la funcionalidad del modelo, así como a generar un código que permita agilizar y sistematizar el análisis de las simulaciones del estudio.

En relación con los resultados, según cifras oficiales en el primer año de la pandemia se registraron 698.047 casos [15], mientras que la simulación estimó 679.705 casos nuevos para el mismo periodo. Esta diferencia puede explicarse porque el ejercicio consideró únicamente el COVID-19 y no sus interacciones con otras enfermedades. Lo anterior sugiere que DYNAMO-HIA entrega resultados consistentes, aunque con una ligera subestimación en la magnitud de los contagios, lo que ya se encuentra advertido en el manual de usuario [16].

Adicionalmente, se realizó una simulación preliminar a diez años para el escenario ideal, utilizando información epidemiológica del IAM. Los resultados de este ejercicio indican que podrían evitarse aproximadamente 3.147 IAM durante el período analizado, asociados a la población beneficiada.

En conjunto, estos hallazgos destacan la utilidad de DYNAMO-HIA como herramienta de evaluación, al permitir cuantificar el impacto potencial de políticas de salud pública como *Bolsillo Saludable* y proyectar su aporte en el diseño y análisis de futuras políticas públicas.

REFERENCES

[1] Organización Mundial de la Salud. Monitoreo de los avances en relación con las enfermedades no transmisibles 2022. 2022.

[2] Malik VS, Hu FB. The role of sugar-sweetened beverages in the global epidemics of obesity and chronic diseases. Nat Rev Endocrinol. 2022.

[3] Heidemann C, Schulze MB, Franco OH, van Dam RM, Mantzoros CS, Hu FB. Dietary patterns and risk of mortality from cardiovascular disease, cancer, and all causes in a prospective cohort of women. Epub 2008.

[4] GBD 2017 Diet Collaborators. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. Lancet. 2019.

[5] Ministerio de Salud. Primeros *Resultados Encuesta Nacional de Salud (ENS) 2016-2017*. 2017.

[6] Ministerio de Salud. Segundos *Resultados Encuesta Nacional de Salud (ENS) 2016-2017*. 2017.

[7] Cediel G, Reyes M, Corvalán C, Levy RB, Uauy R, Monteiro CA. Ultra-processed foods drive to unhealthy diets: evidence from Chile. Public Health Nutr. 2021.

[8] *Chile Data — Global Diet Quality Project*. (s. f.). https://www.dietquality.org/countries/chl.

[9] Boshuizen HC, Lhachimi SK, van Baal PH, Hoogenveen RT, Smit HA, Mackenbach JP, Nusselder WJ. The DYNAMO-HIA model: an efficient implementation of a risk factor/chronic disease Markov model for use in Health Impact Assessment (HIA). Demography. 2012.

[10] Lhachimi SK, Nusselder WJ, Smit HA, van Baal P, Baili P, Bennett K, Fernández E, Kulik MC, Lobstein T, Pomerleau J, Mackenbach JP, Boshuizen HC. DYNAMO-HIA--a Dynamic Modeling tool for generic Health Impact Assessments. PLoS One. 2012.

[11] Boshuizen, H. (2010). *Description of DYNAMO-HIA calculations (Version DYNAMO-HIA-2)*. RIVM Technical Report EMI/STATMOD/201001. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

[12] Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE). (2024). *Censo de Población y Vivienda 2024* [Base de datos]. Disponible en: https://censo2024.ine.gob.cl/.

[13] Ministerio de Salud de Chile (MINSAL). (s. f.). *Encuesta Nacional de Salud (ENS)* [Bases de datos e informes]. Recuperado de https://epi.minsal.cl/encuesta-ens/.

[14] Ministerio de Salud de Chile (MINSAL). (s. f.). *Enfermedades no transmisibles (ENT)* [Bases de datos e informes]. Recuperado de https://epi.minsal.cl/.

[15] Instituto Nacional de Estadísticas (INE) & Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS), Ministerio de Salud. (2023). *Impactos del Covid-19 en la mortalidad de Chile durante 2020: Una mirada demográfica y de salud* (Versión 2, enero 2025). Instituto Nacional de Estadísticas.

[16] Lhachimi, S. K., Boshuizen, H. C., Mondeel, R. L., & Nusselder, W. J. (2012). *DYNAMO-HIA: User guide and manual (Version 2.0.8)* [Manual de usuario]. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

Comparación de un modelo y metaheurísticas para la selección y programación de proyectos de investigación en la Antártica

Mauricio Vega-Hidalgo
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción
Concpepción, Chile
mauriciovega@udec.cl

Lorena Pradenas
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Concepción
Concpepción, Chile
lpradena@udec.cl

Víctor Parada
Departamento de Ingeniería Informática
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
victor.parada@usach.cl

***Resumen*—Este trabajo presenta un enfoque de optimización para la selección y programación de proyectos de investigación en la Antártica, un entorno que impone complejas restricciones logísticas y medioambientales. Se propone un modelo matemático de programación entera mixta (MIP) y tres metaheurísticas (ILS, VNS y SA) capaces de resolver instancias de gran escala, permitiendo maximizar el beneficio neto científico mediante la adecuada asignación de recursos entre estaciones. La propuesta contribuye a la gestión eficiente de la ciencia en condiciones extremas.**

***Index Terms*—Selección y programación de proyectos, Programación entera mixta, Metaheurísticas, Ciencia Antártica**

I. Introducción

La Antártica constituye un entorno singular para la investigación científica debido a su relevancia para comprender el cambio climático global y las dinámicas ecológicas. Sin embargo, las severas condiciones climáticas, la lejanía y la limitación de recursos imponen restricciones logísticas y medioambientales que complejizan la selección y programación de proyectos de investigación. Frente a esta problemática, se propone el *Research Project Selection and Scheduling in Multiple Antarctic Stations Problem* (RPSAP), el cual busca maximizar el beneficio neto científico bajo restricciones operacionales.

II. Revisión de la literatura

El problema de selección y programación de portafolios de proyectos (PPSSP) ha sido ampliamente estudiado en contextos como construcción, defensa y energía. Tradicionalmente, este problema se divide en la selección de proyectos (PPSP) y la programación bajo restricciones de recursos (RCPSP). El PPSP extiende el clásico problema de la mochila al considerar interdependencias, precedencias y sinergias entre proyectos [1], [2]. Por su parte, el RCPSP aborda la asignación de recursos limitados y la programación con múltiples objetivos como minimizar el costo o maximizar el valor presente neto [3], [4].

Este estudio fue financiado por ANID—Subdirección de Capital Humano/Doctorado Nacional/2021 under Grant 21210451

Las extensiones al RCPSP incluyen variantes con transferencia de recursos (RCPSP-RT) y escenarios multi-sitio (RCPSP-MS), que consideran tiempos y costos de transferencia entre sitios o actividades [5], [6]. Sin embargo, ninguno de estos enfoques ha sido aplicado a la planificación de la investigación antártica, la cual impone restricciones adicionales como la sostenibilidad ambiental y la logística extrema.

El RPSAP se posiciona como la primera formulación que integra la selección y programación de proyectos en un entorno multi-sitio bajo condiciones antárticas, ampliando los límites de aplicación del PPSSP y ofreciendo una contribución relevante tanto teórica como práctica.

III. Modelamiento Matemático

Se formula el RPSAP como un modelo de Programación Entera Mixta (MIP), que integra restricciones de precedencia entre proyectos, capacidades específicas de estaciones, tiempos de transporte entre bases, y criterios de sostenibilidad. La función objetivo maximiza el beneficio neto, definido como la diferencia entre los ingresos generados por los proyectos seleccionados y los costos totales incurridos, incluyendo el uso de recursos, el transporte y las medidas de mitigación ambiental.

El modelo emplea una representación en tiempo continuo para garantizar la secuenciación adecuada de los proyectos y la asignación eficiente de recursos, tanto fijos como transportables. Las restricciones aseguran el cumplimiento de las precedencias, la no solapación de recursos entre proyectos simultáneos, y la programación dentro del horizonte temporal disponible.

IV. Metaheurísticas Propuestas

Dado que el RPSAP es un problema NP-hard, se desarrollaron tres metaheurísticas para resolver instancias de gran escala:

- **Iterated Local Search (ILS):** Utiliza un procedimiento de búsqueda local intensiva, complementado con operadores de perturbación para diversificar la exploración del espacio de soluciones.

Tabla I
RESUMEN DE RESULTADOS PARA CADA MÉTODO.

	Gap Relativo					Tiempo de ejecución (s)			
Método	Min.	Prom.	DE	Max.	%SO	Min.	Prom.	DE	Max.
CTM	0	1.310	1.777	15.198	6.875	0.13	279.92	76.05	306.42
ITM	0	1.277	1.734	8.975	6.875	0.14	279.90	76.04	306.34
ILS	0.020	0.325	0.432	1.977	0	300.001	303.696	4.549	336.253
VNS	0.020	0.326	0.433	1.984	0	300.002	442.321	497.098	3982.884
SA	0.020	0.347	0.456	2.038	0	6.524	34.262	20.188	108.645

Las abreviaturas están definidas de la siguiente forma: CTM - Continuous time model (modelo de tiempo continuo); ITM - Integer time model (modelo de tiempo entero); ILS - Iterated local search; VNS - Variable neighborhood search; SA - Simulated annealign; Min. - Mínimo; Prom. - Promedio; DE - Desviación estándar; Max - Máximo; %SO - Porcentaje de instancias en las que el método obtuvo soluciones óptimas.

- **Variable Neighborhood Search (VNS):** Explora sistemáticamente distintos vecindarios mediante el intercambio de bloques consecutivos de proyectos, equilibrando intensificación y diversificación.
- **Simulated Annealing (SA):** Emplea un esquema de aceptación probabilística de soluciones peores para escapar de óptimos locales, con un calendario adaptativo de enfriamiento.

Para representar la solución, las metaheurísticas se basan en un algoritmo de programación por listas (list-scheduling), que construye soluciones factibles respetando restricciones de precedencia, recursos y transporte.

V. EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES

Se diseñaron y crearon aleatoriamente 480 instancias de prueba, distribuidas en 60 clases, con variaciones en el número de proyectos (10 a 30), bases (2 o 3), tipos de recursos (10 o 20) y horizontes de tiempo (30, 60, 120 períodos), llamados parámetros de control. La diponibilidad, requerimientos, distribución y costos de uso de recursos, tiempos de ejecución y transporte, ingresos por proyecto seleccionado, y relaciones de precedencia fueron generados aleatoriamente, basados en datos del mundo real, y usando estrategias de la literatura [6]–[8]. El modelo MIP se resolvió con CPLEX, suponiendo tiempo continuo (CTM) y tiempo entero (ITM), mientras que las metaheurísticas fueron implementadas en Python, y se ejecutaron 20 repeticiones en cada instancia. En todos los experimentos el tiempo máximo de ejecución fue de 300 segundos.

Los resultados revelan que el modelo exacto es efectivo en instancias pequeñas, pero su eficiencia computacional decae en problemas de mayor escala. Por el contrario, las metaheurísticas mantuvieron una alta calidad de soluciones en todos los escenarios. ILS se destacó por ofrecer el mejor balance entre calidad de soluciones y tiempo de cómputo, mientras que SA fue competitivo en tiempo de ejecución. La Tabla I muestra un resumen de los resultados.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo constituye la primera aplicación del PPSSP en el contexto antártico con un enfoque multi-sitio, extendiendo el estado del arte en la optimización combinatoria. Las herramientas propuestas permiten a los gestores de la ciencia optimizar la asignación de recursos, minimizar impactos ecológicos y priorizar proyectos de alto impacto.

Futuras investigaciones podrían incorporar incertidumbre en parámetros críticos, tales como tiempos de transporte y disponibilidad de recursos, mediante enfoques estocásticos o robustos. Además, se vislumbra la extensión del modelo para integrar criterios multicriterio que reflejen la diversidad de objetivos presentes en las operaciones científicas antárticas.

REFERENCIAS

[1] Li, X., Fang, S. C., Guo, X., Deng, Z., & Qi, J. (2016). "An extended model for project portfolio selection with project divisibility and interdependency". Journal of Systems Science and Systems Engineering, 25(1), 119–138. https://doi.org/10.1007/s11518-015-5281-1

[2] Tavana, M., Khosrojerdi, G., Mina, H., & Rahman, A. (2020). "A new dynamic two-stage mathematical programming model under uncertainty for project evaluation and selection". Computers and Industrial Engineering, 149(April), 106795. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106795

[3] Artigues, C. (2017). "On the strength of time-indexed formulations for the resource-constrained project scheduling problem". Operations Research Letters, 45(2), 154–159. https://doi.org/10.1016/j.orl.2017.02.001

[4] Thiruvady, D., Blum, C., & Ernst, A. T. (2019). "Maximising the net present value of project schedules using CMSA and parallel ACO". In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 11299 LNCS (pp. 16–30). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05983-5_2

[5] Rostami, M., Bagherpour, M., Mazdeh, M. M., & Makui, A. (2017). "Resource Pool Location for Periodic Services in Decentralized Multi-Project Scheduling Problems". Journal of Computing in Civil Engineering, 31(5), 1–16. https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000671

[6] Laurent, A., Deroussi, L., Grangeon, N., & Norre, S. (2017). "A new extension of the RCPSP in a multi-site context: Mathematical model and metaheuristics". Computers and Industrial Engineering, 112, 634–644. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.028

[7] Kolisch, R., & Sprecher, A. (1997). "PSPLIB - A project scheduling problem library." European Journal of Operational Research, 96(1), 205–216. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00170-1

[8] Kumar, M., Mittal, M. L., Soni, G., & Joshi, D. (2018). "A hybrid TLBO-TS algorithm for integrated selection and scheduling of projects". Computers & Industrial Engineering, 119(March), 121–130. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.029

Session N°9 – Track N°1

Analytics and Artificial Intelligence

Chair: López, J. *(Universidad Diego Portales)*
Place: G6-054
Time: 08:30 – 09:45

Decision-oriented System Relevance Ranking for Log Analysis at Paranal Observatory using Extended MULTIMOORA

Time: 08:30 – 08:45
Authors:

- Catalán, A. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Carrasco, R. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Ruz, G. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*

Notes on the Interpretability of Neural Network Dense Layers: Cross-semantics

Time: 08:50 – 09:05
Authors:

- Trenti, E. *(Universidad Nacional de Salta)*
- Massé-Palermo, M. *(Universidad Nacional de Salta)*

Fish Age Estimation from Otoliths via Convolutional Neural Networks

Time: 09:10 – 09:25
Authors:

- Cho, A. *(Universidad Mayor)*
- Moyano, G. *(Instituto de Fomento Pesquero de Chile)*
- Miranda, M. *(Instituto de Fomento Pesquero de Chile)*
- Jiménez, D. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- Lazcano, V. *(Universidad Mayor)*

Embedded Feature Selection for Robust SVM Classification by using lp-norm

Time: 09:30 – 09:45
Authors:

- López, J. *(Universidad Diego Portales)*
- Marechal, M. *(Universidad Diego Portales)*
- Carrasco, M. *(Universidad de Los Andes)*
- Ivorra, B. *(Universidad Complutense de Madrid)*
- Ramos, A. *(Universidad Complutense de Madrid)*

Decision-oriented system relevance ranking for log analysis at Paranal Observatory using extended MULTIMOORA

1st Andrés H. Catalán
Faculty of Engineering and Sciences
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
andcatalan@alumnos.uai.cl

2nd Rodrigo A. Carrasco
Institute of Mathematical Engineering and Computation & School of Engineering
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
rcarrass@uc.cl

3rd Gonzalo A. Ruz
Faculty of Engineering and Sciences
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
gonzalo.ruz@uai.cl

***Abstract*—We propose a decision-oriented method for anomaly detection in telescope logs at Paranal Observatory, integrating sentiment-aware Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) models with SHapley Additive Explanations (SHAP)-based explainability and Multi-Criteria Decision-Making (MCDM). By converting model outputs into a structured decision matrix and applying an extended MULTIMOORA method with IDOCRIW-derived weights, our approach enables interpretable and optimized subsystem prioritization.**

***Index Terms*—Log anomaly detection, explainability, IDOCRIW, MULTIMOORA, multi-criteria decision-making**

I. Introduction

Astronomical observatories generate high-volume, semi-structured logs, making manual anomaly detection infeasible [1]. Given the fragmented nature of real-world logs, we adopt an entry-level classification approach using sentiment analysis with a fine-tuned BERT model [2], framing anomaly detection as a binary task. Model outputs are explained via SHAP values [3] and integrated into an MCDM framework to prioritize system relevance. Validation on operational data confirms the effectiveness of this interpretable and decision-oriented methodology.

A. Our Contribution

This work presents the following contributions:

- A sentiment-based anomaly detection pipeline using fine-tuned BERT and SHAP for interpretable log scoring.
- An MCDM integration of SHAP explanations to prioritize subsystems via explainable rankings.
- An extended MULTIMOORA method with IDOCRIW weights and formal modifications for interpretability and robustness.

II. Anomaly Detection Approach for Paranal Observatory

Paranal Observatory generates over 500 million monthly logs from ∼50 subsystems, including data from VLTI instruments GRAVITY, PIONIER, and MATISSE [4], [5]. We fine-tune a BERT model for sentiment-based anomaly detection on the *Parlogs-Observations* dataset and use SHAP to compute word-level importance scores. These are aggregated and integrated into an MCDM framework to rank subsystem relevance under new logs.

A. Log Preprocessing

The preprocessing stage generates a structured dataset $\mathcal{L}_{\text{final}}$ using a character-level strategy. Logs are categorized into error ($\mathcal{L}_{\text{err}}$) and non-error ($\mathcal{L}_{\text{nor}}$) entries:

$$\text{label}(l) = \begin{cases} 0, & \text{if errcode}(l) \text{ or errdata}(l) \neq \emptyset, \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{1}$$

Final entries include cleaned text, system ID, and labels.

B. Vectorization, Fine-Tuning, and Dictionary Development

Cleaned logs $T_i \in \mathcal{L}_{\text{final}}$ are tokenized and embedded using BERT. Mean pooling yields vectors $\mathbf{e}_i$ that feed a classifier. To explain outputs, SHAP values ϕ_t are computed:

$$\phi_t \approx (\mathbf{x}_i^{[t]} - \mathbf{b}^{[t]}) \cdot \int_0^1 \frac{\partial f(\mathbf{b} + \alpha(\mathbf{x}_i - \mathbf{b}))}{\partial \mathbf{x}^{[t]}} d\alpha \tag{2}$$

These are aggregated into:

$$\text{SHAP}(w) = \frac{1}{|\tau(w)|} \sum_{t \in \tau(w)} \phi_t \tag{3}$$

C. Decision Matrix Construction Process

In the inference stage, each log $l \in \mathcal{L}_{\text{final}}$ is scored using a Paranal-specific dictionary $\mathcal{D}$. For each word $w \in l$, we assign a score $s(w)$ as:

$$s(w) = \begin{cases} \mathcal{D}(w), & \text{if } w \in \mathcal{D}, \\ \max\limits_{v \in \mathcal{D}} \left[\text{sim}(w, v) \cdot \mathcal{D}(v)\right], & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{4}$$

where $\mathrm{sim}(w, v)$ denotes cosine similarity in the BERT embedding space. The log-level negativity score is then computed using a normalized RMS formulation:

$$S_{\log}^{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} s_i^2}{\sum_{i=1}^{N} s_i}}, \quad s_i = s(w_i). \tag{5}$$

We compute the average negativity per system–instrument pair, forming the decision matrix $\mathbf{T} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{m \times n}$, where:

$$a_{ij} = \frac{1}{|\mathcal{L}_{ij}|} \sum_{l \in \mathcal{L}_{ij}} S_{\log}^{\mathrm{RMS}}(l), \tag{6}$$

and $\mathcal{L}_{ij}$ is the set of logs from system A_i under instrument C_j.

D. Weighting Criteria using IDOCRIW

Given the cost-type matrix $\mathbf{T} = [a_{ij}]$, we apply a modified version of the IDOCRIW method [6] to compute criteria weights w_j^{Id}. First, the values are transformed into benefit-type scores as:

$$r_{ij} = \frac{\min_i a_{ij}}{a_{ij}}, \tag{7}$$

ensuring that higher values reflect better behavior. From this, we compute CILOS-based weights using an enhanced formulation that preserves diversity among criteria:

$$a_{jj} = \max_i r_{ij}, \tag{8}$$

$$a_{ij} = r_{ij}, \quad i \neq j. \tag{9}$$

These are used to construct a relative loss matrix and solve for normalized weights w_j^C. In parallel, entropy weights w_j^E are computed based on the dispersion of normalized values across alternatives. The final IDOCRIW weights are:

$$w_j^{\mathrm{Id}} = \frac{w_j^C \cdot w_j^E}{\sum_j w_j^C \cdot w_j^E}. \tag{10}$$

E. Modified MULTIMOORA Framework

To rank alternatives, we use an enhanced MULTIMOORA method [7], incorporating the computed IDOCRIW weights.

Ratio System:

$$R_i = \sum_j w_j^{\mathrm{Id}} \cdot r_{ij}. \tag{11}$$

Reference Point (Euclidean):

$$d_i^{(E)} = \sqrt{\sum_j w_j^{\mathrm{Id}} (r_j^* - r_{ij})^2}, \tag{12}$$

where $r_j^* = \max_i r_{ij}$. Criterion-wise contributions can also be computed for analysis.

Multiplicative Form (Log-Linear):

$$\log S_i = \sum_j w_j^{\mathrm{Id}} \log r_{ij}. \tag{13}$$

Aggregation via Dominance-Directed Graph (DDG): Each method produces a ranking. The final score is computed as the number of pairwise dominances across methods:

$$R_i = \sum_{m=1}^{3} \sum_{j \neq i} I(A_i \succ_m A_j), \tag{14}$$

where $I(A_i \succ_m A_j) = 1$ if A_i outperforms A_j under method m. This provides a robust, integrated subsystem ranking.

III. Results and Discussion

A. Rank-based Relevance Analysis

The decision matrix was built from average SHAP-based negativity scores per subsystem across GRAVITY, PIONIER, and MATISSE, capturing their relative anomaly contributions. These values, shown in Table 1, highlighting the data-driven nature of the evaluation.

TABLE I
SHAP-based decision matrix across VLTI subsystems and instruments

Subsystem	GRAVITY	PIONIER	MATISSE
ARAL	0.1508	0.4309	0.2914
AT1	0.1632	0.1544	0.1359
AT2	0.1449	0.1261	0.1239
AT3	0.1530	0.1448	0.1363
AT4	0.1630	0.1817	0.1571
DL	0.1297	0.1806	0.1540
ISS	0.2137	0.2381	0.2004
RMNREC	0.2124	0.2223	0.1708

We used the IDOCRIW method to weight each instrument, combining CILOS and Entropy schemes. Due to low intercriteria variability, CILOS assigned equal weights, while Entropy emphasized PIONIER for its higher score dispersion. The final weights reflect both theoretical balance and empirical differentiation (Table 2).

TABLE II
Weights assigned to each instrument using the IDOCRIW method

Instrument (Criterion)	CILOS	Entropy	IDOCRIW
GRAVITY	0.3333	0.1433	0.1433
PIONIER	0.3333	0.5564	0.5564
MATISSE	0.3333	0.3003	0.3003

The aggregated scores per subsystem were computed using the three components of the MULTIMOORA framework—Ratio, Reference Point, and Multiplicative Form—prior to final dominance aggregation, as shown in Table 3.

To rank subsystems by SHAP-based negativity, we apply MULTIMOORA with IDOCRIW weights. Negativity scores are inverted to fit benefit-type assumptions, and the ranking is reversed so that rank 1 indicates highest criticality (Table 4).

Using the extended MULTIMOORA model, we computed instrument-level contributions to subsystem anomaly exposure. Results (Figure 1) show PIONIER as the main source of negativity in most subsystems, except AT2, where GRAVITY

TABLE III
AGGREGATED SCORES BY SUBSYSTEM FROM THE THREE MULTIMOORA COMPONENTS

Subsystem	Ratio Score	Reference Score	Multiplicative Score
ARAL	0.2829	0.1084	-1.2710
ISS	0.3384	0.0434	-1.0834
RMNREC	0.3462	0.0363	-1.0608
AT4	0.3610	0.0207	-1.0189
DL	0.3637	0.0194	-1.0114
AT1	0.3705	0.0112	-0.9932
AT3	0.3734	0.0078	-0.9853
AT2	0.3801	0.0024	-0.9676

TABLE IV
FINAL RANKING OF SUBSYSTEMS USING THE MULTIMOORA METHOD

Subsystem	MULTIMOORA Score	Negativity Rank
ARAL	0	1
ISS	3	2
RMNREC	6	3
AT4	9	4
DL	12	5
AT1	15	6
AT3	18	7
AT2	21	8

dominates. MATISSE remains consistently moderate, guiding targeted monitoring efforts.

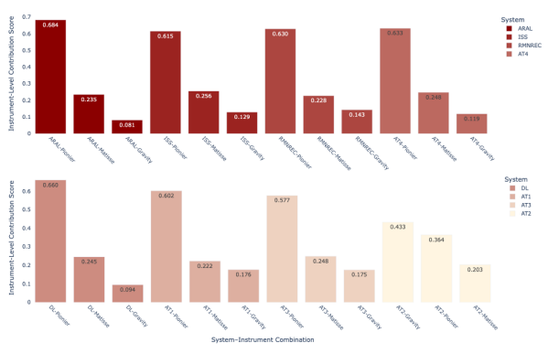


Fig. 1. Integrated instrument contribution scores derived from MULTIMOORA analysis

B. In-depth analysis and key insights

To enhance interpretability, we used the SHAP-based dictionary to extract key word-level attributions. Figure 2 shows the top five negative words per instrument, while Figure 3 highlights their impact within subsystem logs.

IV. CONCLUSION

We introduced an interpretable anomaly detection framework for telescope logs, combining sentiment-aware BERT, SHAP explainability, and an extended MULTIMOORA method. Our approach enables traceable subsystem prioritization and highlights instrument-specific contributions. Results support its applicability for operational decision-making at Paranal Observatory.

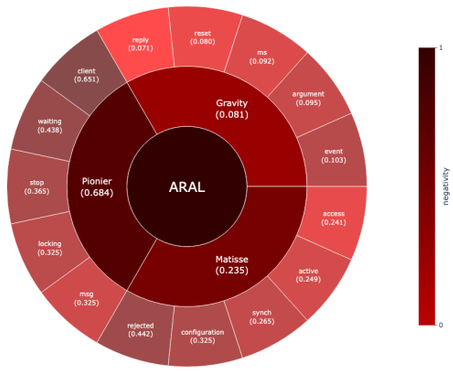


Fig. 2. Top 5 negative words per instrument across ARAL subsystem

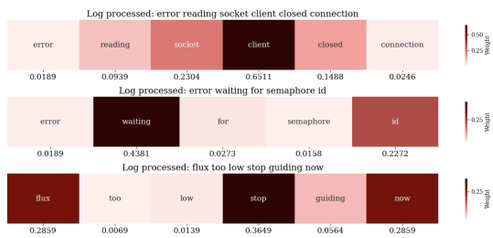


Fig. 3. Top 3 ARAL subsystem logs showing negative word-level contributions

ACKNOWLEDGMENT

This research was partially funded by the ANID FONDECYT Grant 1231245. G.A.R thanks ANID-MILENIO-NCN2024_103, ANID PIA/BASAL AFB240003, and Centro de Modelamiento Matemático (CMM) FB210005, BASAL funds for centers of excellence from ANID-Chile.

REFERENCES

[1] A. Pecchia, M. Cinque, G. Carrozza, and D. Cotroneo, "Industry practices and event logging: Assessment of a critical software development process," in *2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering*, vol. 2. IEEE, 2015, pp. 169–178.

[2] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, "Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding," in *Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies, volume 1 (long and short papers)*, 2019, pp. 4171–4186.

[3] S. M. Lundberg and S.-I. Lee, "A unified approach to interpreting model predictions," *Advances in neural information processing systems*, vol. 30, 2017.

[4] European Southern Observatory (ESO), "Paranal Observatory," 2025, accessed: March 7, 2025. [Online]. Available: https://www.eso.org/public/chile/teles-instr/paranal-observatory/

[5] Paranal Observatory, "Paranal Log Observations Dataset," Online. Available: https://huggingface.co/datasets/Paranal/parlogs-observations, 2025, accessed: 10-Mar-2025.

[6] E. K. Zavadskas and V. Podvezko, "Integrated determination of objective criteria weights in mcdm," *International Journal of Information Technology & Decision Making*, vol. 15, no. 02, pp. 267–283, 2016.

[7] W. K. M. Brauers and E. K. Zavadskas, "Project management by multimoora as an instrument for transition economies," *Technological and economic development of economy*, vol. 16, no. 1, pp. 5–24, 2010.

Notes on the Interpretability of Neural Network Dense Layers: Cross-semantics

Edgardo Javier Trenti
Departamento de Informática
Facultad de Ciencias Exactas - UNSa
Salta, Argentina
jtrenti@di.unsa.edu.ar

María Laura Massé Palermo
Departamento de Informática
Facultad de Ciencias Exactas - UNSa
Salta, Argentina
mlmassep@di.unsa.edu.ar

***Abstract*—This extended abstract introduces an intuitive and exploratory approach to identify features of interest within simple models and transfer them to a more complex architecture (specifically, an autoencoder), aiming to characterize the observed phenomenon. We analyze the behavior of the weight matrices in feedforward neural networks trained on two distinct function signaling tasks using the MNIST dataset. The resultant weight matrix values appear to modulate the hidden layer activations to yield luminance invariance in the network's output, achieved through a variance reduction procedure.**

***Index Terms*—cross-semantics, neural networks, interpretability, explainability, dense layers, luminance invariance**

I. Introduction

One of the major challenges when delegating complex decision-making tasks to Artificial Intelligence systems, particularly in high-stakes contexts where failure can lead to significant losses, is maintaining a strong commitment to the accuracy and reliability of their results. While these tools have demonstrated a high degree of confidence, the difficulty lies in the lack of elements that allow for the interpretation of the knowledge representations responsible for the responses provided by these devices.

Extensive research has been conducted on this topic [1], [2], [4]. However, there is still no broad and definitive consensus on the underlying structure that should support the interpretation process for Artificial Neural Network (ANN) results. Due to the intrinsic complexity of knowledge representation, deriving a consistent set of rules from these devices remains challenging. Zhang et al. [4] propose a three-dimensional taxonomy to explain neural network behavior. Earlier, Montavon et al. [2] distinguished between the concepts of *interpretable artificial intelligence* (IAI) and *explainable artificial intelligence* (XAI) for deep neural networks, and there are even those who see XAI as a subset of IAI [3]. Regarding specific techniques, Petsiuk et al. [5] present a saliency map approach to explain image classification problems in deep neural networks. Similarly, Bau et al. [6] describe a method for interpreting latent representations in hidden units by relating them to a set of semantic concepts. One approach for interpreting latent representations employs multi-task learning to solve multi-objective optimization problems through transfer learning, which serves to minimize generalization error [7], [8]. Another technique used for interpretability is disentangled representations. This aims to derive independent factors of variation, such as color, model, and observation angle in car images. This discrimination allows for greater precision regarding the factors that distinguish different instances in the input space [9], [10]. These methods to studying internal representations of the input space fundamentally investigate the reasons why the transfer of their representations appears to be so effective. Among them, representation alignment searches across different architectures, configurations, models, and tasks for common factors that enable the transfer of internal semantic representations [11]–[13].

In most of the mentioned articles, knowledge representations are based on convolutional models. Considering that the underlying learning algorithm since the neural network revival in the mid-1980s is the well-known backpropagation algorithm, we propose to move from a simple approach to a more complex one.

The naïve cross-semantics proposal focuses on a process that requires the participation of a human analyst, being more intuitive and reliant on pure observation. It starts from the premise that an autoencoder model provides the optimal encoding of the input, given that its objective is to reconstruct the input to its original state through a near-symmetric process. It then uses the same training set for learning a simpler task (in this case, classification), thereby attempting to reinterpret the auto-encoding task by leveraging a significantly reduced set of elements.

II. Methods: XAI and optimization

Within the Probably Approximately Correct (PAC) learning framework, we define the target concept as the unknown underlying function $c : \mathcal{X} \to \mathcal{Y}$, which maps instances from the input space $\mathcal{X}$ to elements of a set of target values $\mathcal{Y}$. This function constitutes the learning object of a machine learning process.

Since the underlying function that defines the concept is unknown, the actual objective is to find the hypothesis $h \in \mathcal{H}$

Trabajo realizado con soporte del Departamento de Informática. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.

that minimizes the empirical loss $\hat{\mathcal{L}}_{\mathcal{S}}$ over the sample $\mathcal{S}$:

$$\min_{h \in \mathcal{H}} \hat{\mathcal{L}}_{\mathcal{S}}(h) \tag{1}$$

To understand the utility of the parameter values comprising the weight matrices in the minimization process, we compare two neural network models that use the same training set, but whose tasks differ in their objective. We start by observing the simpler model (classification) to derive a hypothesis that is shared by the more complex model (autoencoder).

We use the classic MNIST dataset with a classification neural network featuring the configuration $784 \times 16\,(ReLU) \times 10\,(softmax)$, and an autoencoder with the configuration $784 \times 16\,(ReLU) \times 784\,(sigmoid)$. Both models incorporate a single hidden layer comprising 16 neurons, thereby maximally simplifying the parameter analysis. Following the taxonomy proposed by Zhang [4], we seek a *passive*, *global* explanation of the *hidden semantics*.

A. Disaggregated Components in Hidden Layer Activation

Instead of summing the weighted activations to obtain the *induced local field* ν_k. The computation of hidden layer activations is rearranged to visualize the intermediate results and appreciate the operation of the different filters. We apply the Hadamard product to obtain the image mediated by the filters defined by the weight matrix $W^{(0)}$ prior to the hidden layer.

$$\nu_k^{(1)} = \sum_{i,j} \left(\mathbf{W}^{(0)}_{k,(28\times 28)} \odot \mathbf{x}_{(28\times 28)} \right) + b_k^{(0)} \tag{2}$$

where $\nu_k^{(1)}$ is a scalar value, result of de sum of all elements of the matrix obtained by the Hadamard product of input matrix $\mathbf{x}_{(28\times 28)}$ with the k^{th} filter of the weight matrix, $\mathbf{W}^{(0)}_{k,(28\times 28)}$. To the scalar resulting from this internal summation is added $b_k^{(0)}$, the k^{th} component of the vector that represents the bias. Thus, as a result of this operation for the 16 k-values, we obtain the canonical expression for $\boldsymbol{\nu}^{(2)}_{784\times 1}$.

III. Results

The summation of the filters conforms the induced local field for the output layer, working differently than normal, but achieving the same result. The sum of the 17 matrices (filters plus bias), must finally pass through the activation function $sigmoid$ to produce the final image, the 28×28 matrix that reconstruct approximately the original digit. This reconstruction is shown in Fig. (1). Note that some of the coefficientes in the output of the hidden layer become negligible, nullifying in this way the respective matrices.

A. Cross-semantics for MNIST

The cross-semantics approach presented here involves observing the differences that may arise in the internal knowledge representation by the neural network when exactly the same data are used for training different tasks. In the data analysis of the classification model, upon examining the means and variances for 892 observations from the test set, we found

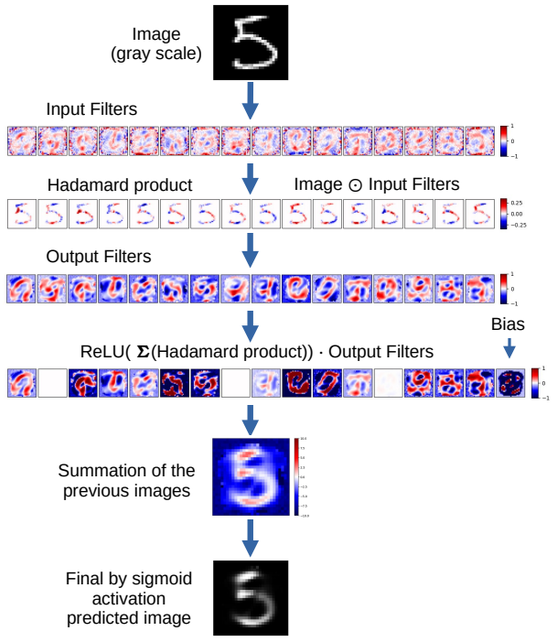


Fig. 1. Prediction of the autoencoder in the second instance of digit 5 in the test set of MNIST. In the forward process we employ color map scales, for a better illustration of excitatory or inhibitory conections.

a significant variance reduction for the majority of inter-digit combinations when weighting the hidden layer activations with the corresponding weight matrix. The curves corresponding to digit 5 can be observed in Fig. (2.a).

B. Quantitative measurements

The observation of the graphs intuitively leads us to consider the possibility that in all cases, a variance reduction exists between the hidden layer activations and the weight-matrix-driven weightings performed on those activations. After constructing the confidence intervals of the paired differences, we found, as seen in Fig. (2.b), that the heatmap for the lower bound of the confidence intervals, in the vast majority of cases, presents a positive value, which implies a statistically significant difference between the two variances.

Transferring these results to the auto-encoding model, we observe that the confidence intervals for each of the 784 pixels in every digit image exhibit statistically significant differences Fig. (3), adding evidence to the hypothesis that the optimization in the weight matrix values may be related to the variance reduction of the encoding of the principal image features. Given that these images are in grayscale and that the values in this scale directly represent the luminance level at each point, this process demonstrates a strong relationship with the reduction of luminance variance.

Therefore, we looked at the activations at the output of the hidden layer. They exhibited high variability and could not be analized without postprocessing. Normalization was not sufficient to make the vectors comparable; however, the

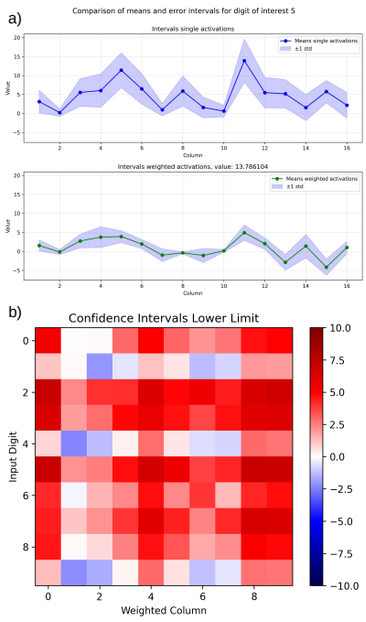


Fig. 2. a) Comparison of means and standar deviations of activations and weighted activations. b) Lower confidence bounds of inter-digit combinations.

product of the activations in the hidden layer $ReLU\left(\boldsymbol{\nu}^{(2)}_{16\times 1}\right)$ by weight matrix $\mathbf{W}^{(1)}_{16\times 10}$ showed characteristic behavior for each digit vector plotted together. This calculation results in a matrix of 10×16, one vector of 16 elements for each digit. We resampled 892 observations from the test dataset and applied MANOVA (*Multivariate ANalysis Of VAriance*) to quantify the null hypothesis testing:

$$\begin{aligned} H_0 &: \boldsymbol{\mu}_0 = \boldsymbol{\mu}_1 = \cdots = \boldsymbol{\mu}_9 \\ H_1 &: \text{exists } i \text{ and } j, \text{ so that } \boldsymbol{\mu}_i \neq \boldsymbol{\mu}_j \end{aligned} \tag{3}$$

where $\boldsymbol{\mu}_i$ is the vector of sample means. The results of the test showed significant differences with $p-values < 0.0001$, and Wilks's lambda value ≈ 0, corresponding to different population distributions.

IV. Discussion

For the autocoder neural network the weight matrices behave like bandpass filters, highlighting characteristics of the different distributions of digits. These filters showed a positive correlation, being remarkable the better definition of filters at the weight matrix nearest to the output. This allow to reconstruct an approximate of the original images with a good perceptual SSIM value. The classification network allows for more precise quantitative analysis at the output of the hidden layer. The hypothesis is that *the filters of both autocoder and classification neural networks mediate a process of reduction of luminance variance at the output of hidden layers*. In the future, we should consider applying null hypothesis tests to the output layer inputs in autoencoding networks, and transfer or latent representations between both models.

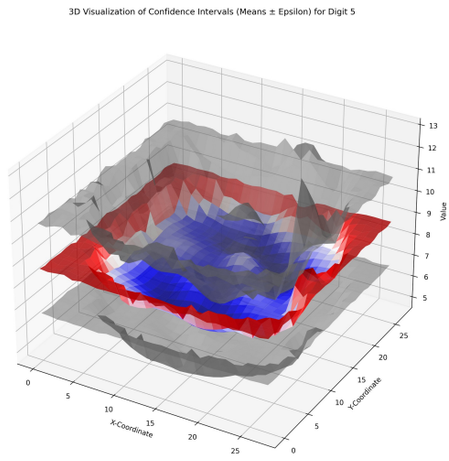


Fig. 3. Confidence intervals for pixels of 5 digit image. None of the intervals includes zero.

References

[1] M. T. Ribeiro, S. Singh, and C. Guestrin, "Why Should I Trust You?," in Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 1135–1144, San Francisco, Aug 2016.

[2] G. Montavon, W. Samek, and K-R Müller, "Methods for interpreting and understandig deep neural networks," in Digital Signal Processing, vol. 73, Eds. Elsevier BV, pp. 1–15, 2018.

[3] C. Wu, R. Buyya, Y. F. Li, and P. Bouvry, "Dataset — Mindset = Explainable AI — Interpretable AI," in arXiv:2408.12420, 2024.

[4] Y. Zhang, P. Tino, A. Leonardis, and K. Tang, "A Survey on Neural Networks Interpretability," in IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, vol. 5, pp. 726–742, 2021.

[5] V. Petsiuk, A. Das, and K. Saenko, "RISE: Randomized Input Sampling for Explanation of Black-box Models," in https://arxiv.org/abs/1806.07421, 2018.

[6] D. Bau, B. Zhou, A. Khosla, A. Oliva, and A. Torralba, "Network Dissection: Quantifying Interpretability of Deep Visual Representations," in https://arxiv.org/abs/1704.05796, 2017.

[7] M. Miao, Z. Yang, H. Zeng, W. Zhang, B. Xu, and W. Hu, "Explainable cross-task adaptive transfer learning for motor imagery EEG classification," J Neural Eng. 2023 Nov 30;20(6). doi: 10.1088/1741-2552/ad0c61. PMID: 37963394.

[8] L. Weber, J. Jumelet, E. Bruni, and D. Hupkes, "Language Modelling as a Multi-Task Problem," in Proceedings of the 16th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Main Volume, pp. 2049–2060. doi: 10.18653/v1/2021.eacl-main.176, 2021.

[9] X. Ren, T. Yang, Y. Wang, and W. Zeng, "Learning disentangled representation by exploiting pretrained generative models: A contrastive learning view". arXiv preprint arXiv:2102.10543, 2021.

[10] X. Wang, H. Chen, S. Tang, Z. Wu, and W. Zhu, "Disentangled Representation Learning", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 46, pp. 9677–9696, 2024.

[11] E. Imani, W. Hu, and M. White, "Representation Alignment in Neural Networks", Transactions on Machine Learning Research, 2022.

[12] L. Muttenthaler, J. Dippel, L. Linhardt, R. A. Vandermeulen, S. Kornblith, "Human alignment of neural network representations", arXiv:2211.01201v5, 2022.

[13] S. Nikooroo and T. Engel, "Cross-Model Semantics in Representation Learning", arXiv:2508.03649, 2025.

[14] D. Erhan, Y. Bengio, A. C. Courville, and P. Vincent, "Visualizing Higer-Layer Features of a Deep Network," in Technical report, University of Montreal, 2009.

Fish age estimation from otoliths via Convolutional Neural networks

Anthony D. Cho*, Guillermo Moyano†, María Miranda†, Dora Jiménez‡ and Vanel Lazcano*
*Escuela de Ingeniería, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Santiago, Chile
†División de Investigación Pesquera, Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, Chile
‡Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile
Email: anthony.cho@umayor.cl, guillermo.moyano@ifop.cl, maria.miranda@ifop.cl,
dora.jimenez.a@edu.uai.cl, vanel.lazcano@umayor.cl

***Abstract*—Age estimation of fish is a key source of information for sustainable management of marine resources. Currently, fish age estimation is performed in the laboratory by observing calcified structures called otoliths, located inside the ear of the fish. In the laboratory, a technician counts the number of rings in the otoliths obtaining the age of the fish, which is time-consuming, subjective, and prone to inter-observer variability. In this work, we have proposed a Deep Leaning model to estimate fish age using an image of the otolith from Micromesistius australis (Southern Blue Whiting) and the fish length. Our model practically counts the number of rings in the image of the otoliths estimating the fish age. In order to construct our model, we modified the existing VGG16, composed of five blocks or stages. We added a new skip connection from the beginning to the end of the fourth block of the model. This fact allows the model to preserve some remarkable features. To train and evaluate our model, we used an image dataset constructed by the Instituto de Fomento Pesquero in Chile. The preliminary results obtained show that our proposal achieved a 56% accuracy and 54% F1-Score, outperforming the VGG16-basic model and other skip configurations.**

***Index Terms*—Otoliths, age predictions, fisheries, convolutional neural networks.**

Embedded Feature Selection for Robust SVM Classification by using ℓ_p-norm

Julio López & Matthieu Marechal
Facultad de Ingeniería y Ciencias
University Diego Portales
Santiago, Chile
E-mail: julio.lopez@udp.cl; mathieu.marechal@udp.cl

Miguel Carrasco
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
University of the Andes
Santiago, Chile
E-mail: micarrasco@uandes.cl

Benjamin Ivorra & Angel Ramos
Interdisciplinary Mathematics Institute & Department of Applied Mathematics and Mathematical Analysis
Universidad Complutense de Madrid
Madrid, España.
E-mail: ivorra@ucm.es; angel@mat.ucm.es

***Abstract*—This work presents a comprehensive study on robust classification models with embedded feature selection, particularly tailored for high-dimensional settings. The analysis focuses on three main regularization strategies: the ℓ_0 pseudo-norm, the ℓ_1 norm, and ℓ_p quasi-norm with $0 < p < 1$, all employed to induce sparsity within SVM-type models. Despite its nonconvex and discontinuous nature, the ℓ_0 pseudo-norm remains a widely used tool for promoting highly interpretable models by selecting a minimal set of relevant features. The ℓ_1 norm, in contrast, provides a convex surrogate that balances sparsity and computational efficiency, offering robustness to noise and scalability to large datasets. Meanwhile, the ℓ_p quasi-norms offer even stronger sparsity-inducing capabilities than ℓ_1, albeit at the cost of increased computational complexity due to their nonconvexity. The proposed models integrate these regularizers directly into the optimization framework, employing efficient diagonal algorithms and iterative convex approximation techniques to address numerical challenges. In addition, the study explores complementary feature elimination strategies such as Recursive Feature Elimination (RFE) and Direct Feature Elimination (DFE), further enhancing model interpretability and performance. Extensive computational experiments on benchmark datasets demonstrate that the proposed models outperform standard approaches in terms of balanced accuracy and robustness to perturbations.**

***Index Terms*—Feature selection, Cobb–Douglas, Minimax Probability Machine, Minimum Error Minimax Probability Machine**

I. Introduction

Binary classification remains a central task in machine learning, with applications in domains such as biomedical diagnostics, financial risk modeling, and fault detection systems [1], [2]. Among the most widely used methods in this setting is the Support Vector Machine (SVM) [3], valued for its theoretical guarantees, strong performance on tabular data, and geometric interpretability. SVMs have been successfully extended to high-dimensional scenarios, but their effectiveness can be compromised by noise, distributional shifts, and irrelevant or redundant features in the data. To overcome these limitations, modern classification frameworks must simultaneously promote robustness and sparsity.

Robust models aim to maintain classification accuracy under uncertainty, outliers, or distributional perturbations. Classical models such as the Minimax Probability Machine (MPM) [4] and its extensions [5], [6] achieve this by modeling uncertainty through known data moments and bounding misclassification probabilities using Chebyshev's inequality. These approaches lead to Second-Order Cone Programming formulations [7], enabling robust decision boundaries with theoretical guarantees.

At the same time, feature selection is essential in high-dimensional settings, not only to reduce overfitting and computational cost but also to enhance model interpretability. Embedded feature selection methods incorporate sparsity directly into the optimization process through regularization. A widely adopted approach is ℓ_1-norm regularization [8], which encourages sparsity by shrinking some coefficients to zero. This method is convex and computationally efficient, and has been effectively applied to robust SVM-type models [9].

However, ℓ_1-based methods may not achieve the highest sparsity levels. To address this, the ℓ_0-pseudo-norm, which directly counts the number of nonzero coefficients, offers a more aggressive feature selection mechanism. Despite its nonconvexity and non-differentiability, it has been successfully incorporated into classification models using Difference-of-Convex (DC) programming techniques [10], [11]. These models provide highly interpretable classifiers with fewer active features.

More recently, ℓ_p quasi-norms for $0 < p < 1$ have gained attention as a flexible alternative that combines the sparsity-inducing power of ℓ_0 with smoother optimization behavior. These norms can produce sparser models than ℓ_1 while being easier to optimize than the discontinuous ℓ_0 [12], [13]. Nonetheless, they remain nonconvex, and their integration into robust classification models has been limited. Several tailored algorithms have been proposed to solve ℓ_p-regularized problems in signal processing and regression [14], [15], but their role in embedded feature selection within robust SVM frameworks remains underexplored.

In this work, we propose a unified framework for robust bi-

This work was supported by FONDECYT projects 1230694 and 1251860, by project PID2023-146754NB-I00, funded by MCIU/AEI/10.13039/501100011033 and FEDER, EU, by the European M-ERA.Net through project PCI2024-153478, and by project 23-MATH-09, MORA-DataS.

nary classification with embedded feature selection, leveraging the three regularization strategies: ℓ_1, ℓ_0, and ℓ_p norms. These models are embedded within SVM-type formulations, with robustness incorporated via probabilistic bounds on misclassification error. To solve the resulting nonconvex optimization problems with ℓ_p-norm with $p \in (0,1)$ (resp. ℓ_0-norm), we introduce a novel Diagonal Two-Step Algorithm that combines reweighted convex approximations (resp. DC algorithm) and adaptive updates of auxiliary variables, ensuring scalability and numerical stability. We evaluate the proposed methods on six high-dimensional biomedical datasets characterized by noise and uncertainty. Our experiments demonstrate the advantages and trade-offs of each regularization strategy: ℓ_1 for computational efficiency and robustness, ℓ_0 for maximal sparsity and interpretability, and ℓ_p for flexible control of sparsity under nonconvex constraints.

II. MPM, MEMPM and CD-LeMa approaches

Let $\widetilde{\mathbf{x}}_1$ and $\widetilde{\mathbf{x}}_2$ be n-dimensional random vectors that generate the samples of the positive and negative classes respectively, with mean and covariance matrices given by $(\boldsymbol{\mu}_k, \Sigma_k)$, for $k = 1, 2$, where $\Sigma_k \in \Re^{n\times n}$ are symmetric positive definite matrices. Let us denote the family of distributions which have a common mean and covariance by $\widetilde{\mathbf{x}} \sim (\boldsymbol{\mu}, \Sigma)$.

The MPM, Minimum Error Minimax Probability Machine (MEMPM), and Cobb–Douglas Learning Machine (CD-LeMa) approaches try to find a hyperplane of the form $\mathbf{w}^\top \mathbf{x} + b = 0$ by solving the following chance-constrained optimization problem

$$\begin{aligned} \max_{\substack{\mathbf{w}\neq\mathbf{0},b \\ \alpha_1,\alpha_2}} \; & f(\alpha_1,\alpha_2) \\ \text{s.t.} \; & \inf_{\widetilde{\mathbf{x}}_i\sim(\boldsymbol{\mu}_i,\Sigma_i)} \Pr\{(-1)^{i+1}(\mathbf{w}^\top\widetilde{\mathbf{x}}_i + b) \geq 0\} \geq \alpha_i, \\ & 0 < \alpha_i < 1, \text{ for } i = 1,2, \end{aligned} \tag{1}$$

where the objective function f is given by

$$\begin{cases} \alpha & , \text{ case: MPM and } \alpha = \alpha_1 = \alpha_2, \\ \theta\alpha_1 + (1-\theta)\alpha_2 & , \text{ case: MEMPM and } \alpha_1 \neq \alpha_2, \\ \alpha_1^\theta \alpha_2^{1-\theta} & , \text{ case: CD-LeMa and } \alpha_1 \neq \alpha_2, \end{cases} \tag{2}$$

with $\theta \in (0,1)$ and the infimum is taking over all distributions with mean $\boldsymbol{\mu}$ and covariance matrix Σ. Here, $\alpha_1^\theta \alpha_2^{1-\theta}$ represents the Cobb-Douglas function which has been widely used in economic theory and many industry sectors [16].

By applying the Multivariate Chebyshev Inequality [4, Lemma 1], removing the constraint $\mathbf{w} \neq \mathbf{0}$, and avoiding solution multiplicity, the probabilistic constraint in (1) can be reformulated as

$$\begin{aligned} & (-1)^{i+1}(\mathbf{w}^\top\boldsymbol{\mu}_i + b) \geq \kappa(\alpha_i)\sqrt{\mathbf{w}^\top\Sigma_i\mathbf{w}}, \; 0 < \alpha_i < 1, \\ & (-1)^{i+1}(\mathbf{w}^\top\boldsymbol{\mu}_i + b) \geq 1, \end{aligned} \tag{3}$$

where $\kappa(\alpha_i) = \sqrt{\frac{\alpha_i}{1-\alpha_i}}$ for $i = 1, 2$. The respective formulations belongs to the class of nonlinear SOCP problems, however, the authors proposed efficient algorithms to solve them. For more details, see [4]–[6].

III. Robust models with feature selection

In compact form, the optimization problem addressed in this research is given by

$$\begin{aligned} \min_{\substack{\mathbf{w},b \\ \kappa_1,\kappa_2}} \; & G(\mathbf{w},\kappa_1,\kappa_2) \\ \text{s.t.} \; & (-1)^{i+1}(\mathbf{w}^\top\boldsymbol{\mu}_i + b) \geq \kappa_i\sqrt{\mathbf{w}^\top\Sigma_i\mathbf{w}}, \; \kappa_i \geq 0, \; i = 1,2, \\ & (-1)^{i+1}(\mathbf{w}^\top\boldsymbol{\mu}_i + b) \geq 1, \; i = 1,2, \end{aligned} \tag{4}$$

where the objective function G is defined as

$$\begin{cases} \frac{1}{2}\|\mathbf{w}\|_2^2 + C_1\|\mathbf{w}\|_1 - C_2\frac{1}{1+\kappa^2} & , \; \ell_2\text{-}\ell_1\text{-MPM}(\kappa_1=\kappa_2), \\ \|\mathbf{w}\|_1 - C_1\frac{1}{1+\kappa_1^2} - C_2\frac{1}{1+\kappa_2^2} & , \; \ell_1\text{-MEMPM}, \\ \|\mathbf{w}\|_1 - C_1\ln\left(\frac{\kappa_1^2}{1+\kappa_1^2}\right) - C_2\ln\left(\frac{\kappa_2^2}{1+\kappa_2^2}\right) & , \; \ell_1\text{-CD-LeMa}, \\ \|\mathbf{w}\|_0 - C_1\frac{1}{1+\kappa_1^2} - C_2\frac{1}{1+\kappa_2^2} & , \; \ell_0\text{-MEMPM}, \\ \|\mathbf{w}\|_0 - C_1\ln\left(\frac{\kappa_1^2}{1+\kappa_1^2}\right) - C_2\ln\left(\frac{\kappa_2^2}{1+\kappa_2^2}\right) & , \; \ell_0\text{-CD-LeMa}, \\ \|\mathbf{w}\|_p^p + \frac{C_1}{2}\|\mathbf{w}\|_2^2 + -C_2\frac{1}{1+\kappa^2} & , \; \ell_2\text{-}\ell_p\text{-MPM}(\kappa_1=\kappa_2), \\ \|\mathbf{w}\|_p^p - C_1\frac{1}{1+\kappa_1^2} - C_2\frac{1}{1+\kappa_2^2} & , \; \ell_p\text{-MEMPM}, \\ \|\mathbf{w}\|_p^p - C_1\ln\left(\frac{\kappa_1^2}{1+\kappa_1^2}\right) - C_2\ln\left(\frac{\kappa_2^2}{1+\kappa_2^2}\right) & , \; \ell_p\text{-CD-LeMa}. \end{cases} \tag{5}$$

Here, $C_1, C_2 > 0$ are regularization parameters. The sparsity-inducing terms are defined as follows:

$$\|\mathbf{w}\|_0 = \text{card}\{i : w_i \neq 0\}, \; \|\mathbf{w}\|_p^p = \sum_{i=1}^{n} |w_i|^p, \text{ for } 0 < p \leq 1.$$

We restrict our analysis to models involving only two tunable parameters, ensuring practical calibration and fair comparison across formulations. Depending on the specific form of the objective function G, different numerical strategies have been proposed in [17]–[19] to solve the problem (4).

IV. Numerical Experiments

In this section, we analyze the performance of the proposed models to demonstrate their efficiency in feature selection and solution robustness.

A. Descriptions of the Benchmark Datasets and Methodology

This study evaluates six benchmark datasets, detailed in Table I, which provides the dataset name, number of patterns ($N_p \in \mathbb{N}$), number of features ($N_f \in \mathbb{N}$), and shorthand notation (**Sht. Not.**) used for reference. Further details about these datasets can be found in [11].

TABLE I

Dataset	N_p	N_f	Sht. Not.
Colorectal	62	2000	$\mathbf{B}_C$
Gravier	168	2905	$\mathbf{B}_G$
Lymphoma	96	4026	$\mathbf{B}_L$
West	49	7129	$\mathbf{B}_W$
Pomeroy	60	7128	$\mathbf{B}_P$
Shipp	77	7129	$\mathbf{B}_S$

The analyzed models are derived from Eqs. (4) and (5), and are referred to as: $\mathbf{MPM}_p$ (ℓ_2-ℓ_p-MPM), $\mathbf{MEP}_p$ (ℓ_p-MEMPM), $\mathbf{CDL}_p$ (ℓ_p-CD-LeMa), and $\mathbf{SVM}_p$ (ℓ_p-SVM). To investigate

the influence of the norm parameter on feature selection and robustness, we consider $p \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2\}$.

Feature Selection Methodology: To evaluate feature selection performance, we employ a Recursive Feature Elimination (**RFE**) method, which progressively removes features while maintaining classification accuracy [3]. The methodology, as detailed in [17], is summarized below:

Step 1 Hyperparameter optimization:

- **1.1** Perform a parameter sweep over $\Gamma_{s1} = \{2^{-7}, 2^{-2}, 2^{2}, 2^{7}\} \times \{2^{-7}, 2^{-2}, 2^{2}, 2^{7}\}$ using Leave-One-Out cross-validation, optimizing for the balance accuracy (BACCU) value [20].
- **1.2** Refine the search within a smaller set Γ_{s2} around the solution found in Step **1.1**, yielding final hyperparameters.

Step 2 Using the optimized hyperparameters, the optimization problem is solved with 10-fold cross-validation, and the **RFE** method is implemented to iteratively eliminate features (progressively reducing the feature set to 100%, 75%, 50%, 25%, 10%, 5%, and 1% of the total features) while continuously evaluating model performance.

Given the high computational cost of **RFE**, we adopt the **DFE** method from [17], which reduces computational overhead while achieving comparable results. **DFE** simplifies the process by ordering the components of $\mathbf{w}$ in ascending order and sequentially removing the j smallest elements ($j = 1, \ldots, N_f - 1$), evaluating the reduced model at each step. To compare **RFE** and **DFE**, we compute the minimum number of features (M_{N_f}) required for the mean BACCU achieved by **DFE** to match or exceed the lowest mean BACCU from **RFE**.

B. Impact of the Norm Parameter p on Results

Table II reports the mean BACCU (related only to Colorectal dataset) values obtained as the number of features is progressively reduced (i.e., ranging from 100% to 1% of the N_f features), along with the values of M_{N_f} and the robustness metric (N_{rob}), only for **DFE**, and the mean CPU time T_{CPU} (only for **RFE)+D** and **+R** denote the use of the **DFE** and **RFE** approaches, respectively. For each column, the highest mean BACCU value and the lowest values of M_{N_f} and T_{CPU} are highlighted in bold.

TABLE II
SUMMARY OF THE RESULTS OBTAINED FOR $\mathbf{B}_C$ DATASET.

Model	N_f							M_{N_f}	N_{rob}	T_{CPU} (s)
	100%	75%	50%	25%	10%	5%	1%			
CDL$_0$+R	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	-	-	339
CDL$_0$+D	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	**4**	27	-
CDL$_{0.25}$+R	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	88.4	-	-	471
CDL$_{0.25}$+D	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.8	20	34	-
CDL$_{0.5}$+R	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	88.4	-	-	474
CDL$_{0.5}$+D	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.8	20	34	-
CDL$_{0.75}$+R	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	88.4	-	-	447
CDL$_{0.75}$+D	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.9	85.8	20	33	-
CDL$_1$+R	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	90.9	-	-	30
CDL$_1$+D	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	84.7	22	32	-
CDL$_2$+R	88.4	88.4	88.4	89.7	89.7	89.7	90.6	-	-	153
CDL$_2$+D	88.4	88.4	89.7	89.7	86.9	85.6	68.7	474	**9**	-
MEP$_0$+R	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	-		97
MEP$_0$+D	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	**4**	66	-
MEP$_{0.25}$+R	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	90.9	-	-	209
MEP$_{0.25}$+D	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	85.9	21	35	-
MEP$_{0.5}$+R	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	90.9	-	-	208
MEP$_{0.5}$+D	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	85.9	21	36	-
MEP$_{0.75}$+R	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	90.9	-	-	198
MEP$_{0.75}$+D	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	85.9	21	34	-
MEP$_1$+R	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	87.1	**91.7**	-	-	25
MEP$_1$+D	88.4	88.4	89.7	89.7	86.9	85.6	68.7	27	37	-
MEP$_2$+R	88.4	88.4	89.7	89.7	89.7	89.7	90.7	-	-	19
MEP$_2$+D	88.4	88.4	89.7	89.7	88.4	85.7	65.2	528	10	-
MPM$_{0.25}$+R	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	90.7	-	-	126
MPM$_{0.25}$+D	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	83.7	57.7	185	6	-
MPM$_{0.5}$+R	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	90.7	-	-	126
MPM$_{0.5}$+D	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	83.7	57.7	185	6	-
MPM$_{0.75}$+R	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	85.9	92.4	-	-	164
MPM$_{0.75}$+D	88.4	88.4	88.4	88.4	88.4	83.4	78.7	107	27	-
MPM$_1$+R	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	89.7	-	-	16
MPM$_1$+D	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	**90.9**	89.9	55	19	-
SVM$_0$+R	79.3	82.3	79.3	79.3	73.1	73.1	81.3	-	-	6
SVM$_0$+D	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	79.3	5	291	-
SVM$_{0.25}$+R	82.2	83.4	87.4	78.4	80.9	80.9	80.9	-	-	4
SVM$_{0.25}$+D	82.2	82.2	82.2	82.2	82.2	82.2	82.2	7	77	-
SVM$_{0.5}$+R	79.7	80.9	79.7	77.2	79.7	77.2	75.9	-	-	4
SVM$_{0.5}$+D	79.7	79.7	79.7	79.7	79.7	79.7	79.7	6	67	-
SVM$_{0.75}$+R	80.9	87.2	84.7	84.7	84.7	84.7	83.4	-	-	4
SVM$_{0.75}$+D	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	14	64	-
SVM$_1$+R	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	78.7	-	-	**1**
SVM$_1$+D	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	81.1	**22**	45	-
SVM$_2$+R	84.7	84.7	87.1	83.4	85.9	84.7	81.2	-	-	**1**
SVM$_2$+D	84.7	83.4	85.9	79.7	56.7	51.2	50.0	1430	12	-

V. CONCLUSIONS

In this work, we introduced a robust classification framework with embedded feature selection, designed to produce sparse classifiers that are both computationally efficient and highly interpretable. Our methodology incorporates the ℓ_0-pseudo-norm, the ℓ_1-norm, and the ℓ_p-quasi-norms (with $p \in (0, 1)$) to effectively promote sparsity in each case while simultaneously enhancing robustness to random perturbations in the data.

REFERENCES

[1] A. Kumari, M. Akhtar, M. Tanveer, and M. Arshad, "Diagnosis of breast cancer using flexible pinball loss support vector machine," *Applied Soft Computing*, vol. 157, p. 111454, 2024.

[2] C.-F. Tsai, K.-L. Sue, Y.-H. Hu, and A. Chiu, "Combining feature selection, instance selection, and ensemble classification techniques for improved financial distress prediction," *Journal of Business Research*, vol. 130, pp. 200–209, 2021.

[3] I. Guyon, J. Weston, S. Barnhill, and V. Vapnik, "Gene selection for cancer classification using support vector machines." *Machine Learning*, vol. 46, no. 1-3, pp. 389–422, 2002.

[4] G. Lanckriet, L. Ghaoui, C. Bhattacharyya, and M. Jordan, "A robust minimax approach to classification," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 3, pp. 555–582, 2003.

[5] K. Huang, H. Yang, I. King, M. Lyu, and L. Chan, "The minimum error minimax probability machine," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 5, pp. 1253–1286, 2004.

[6] S. Maldonado, J. López, and M. Carrasco, "The Cobb-Douglas learning machine," *Pattern Recognition*, vol. 128, p. 108701, 2022.

[7] A. Canelas, M. Carrasco, and J. López, "A feasible direction algorithm for nonlinear second-order cone programs," *Optimization Methods & Software*, vol. 34, no. 6, pp. 1322–1341, 2019.

[8] R. Tibshirani, "Regression shrinkage and selection via the Lasso," *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 58, no. 1, pp. 267–288, 1996.

[9] Q. Zhang, H. Wang, and S. W. Yoon, "A 1-norm regularized linear programming nonparallel hyperplane support vector machine for binary classification problems," *Neurocomputing*, vol. 376, pp. 141–152, 2020.

[10] P. Bradley and O. Mangasarian, "Feature selection via concave minimization and support vector machines," in *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning*, ser. ICML '98. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998, pp. 82–90.

[11] J. López, S. Maldonado, and M. Carrasco, "Double regularization methods for robust feature selection and svm classification via dc programming," *Information Sciences*, vol. 429, pp. 377–389, 2018.

[12] W. Chen and Y. Tian, "Lp-norm proximal support vector machine and its

applications," *Procedia Computer Science*, vol. 1, no. 1, pp. 2417–2423, 2010.

[13] J. Tan, Z. Zhang, L. Zhen, C. Zhang, and N. Deng, "Adaptive feature selection via a new version of support vector machine," *Neural Computing and Applications*, vol. 23, pp. 937–945, 2013.

[14] M. Zhao, M. Lin, B. Chiu, Z. Zhang, and X. song Tang, "Trace ratio criterion based discriminative feature selection via $l_{2,p}$-norm regularization for supervised learning," *Neurocomputing*, vol. 321, pp. 1–16, 2018.

[15] Y.-H. Shao, C.-N. Li, M.-Z. Liu, Z. Wang, and N.-Y. Deng, "Sparse lq-norm least squares support vector machine with feature selection," *Pattern Recognition*, vol. 78, pp. 167–181, 2018.

[16] J. Felipe and F. G. Adams, ""a theory of production" the estimation of the cobb-douglas function: A retrospective view," *Eastern Economic Journal*, vol. 31, no. 3, pp. 427–445, 2005.

[17] M. Carrasco, B. Ivorra, J. López, and A. Ramos, "Embedded feature selection for robust probability learning machines," *Pattern Recognition*, vol. 159, p. 111157, 2025.

[18] M. Carrasco, B. Ivorra, J. López, M. Marechal, and A. Ramos, "Enhancing robustness and interpretability in svm classification through ℓ_p-quasi-norms," 2025, https://hdl.handle.net/20.500.14352/118104.

[19] M. Carrasco, B. Ivorra, J. López, and A. Ramos, "Robust svm classification with ℓ_0-norm feature selection," *Journal of Convex Analysis*, vol. 33, pp. xx–xx, 2026.

[20] M. Sokolova and G. Lapalme, "A systematic analysis of performance measures for classification tasks," *Information Processing & Management*, vol. 45, no. 4, pp. 427–437, 2009.

Session N°9 – Track N°2

OR Applications in Healthcare

Chair: Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*
Place: G6-055
Time: 08:30 – 09:45

Budget-Constrained Optimal Cancer Screening with Risk Stratification: A Population-Based Modeling Approach

Time: 08:30 – 08:45
Authors:

- Mondschein-Prieto, S. *(Universidad de Chile)*
- Subiabre, F. *(Universidad de Chile)*
- Yankovic, N. *(Universidad de Los Andes)*

Priorización de Pacientes y Programación de Cirugías Mediante Herramientas de Optimización y Machine Learning

Time: 08:50 – 09:05
Authors:

- Böhm-Ghiringhelli, A. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*
- Vera-Andreo, J. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Localización de Centros de Salud Considerando Vulnerabilidad Social. Aplicación a un Caso de Estudio en la Región de Valparaíso

Time: 09:10 – 09:25
Authors:

- Barría-Fuentes, I. *(Universidad Andrés Bello)*
- Cisternas, P. *(Universidad Andrés Bello)*
- Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*

Estimación de Incidencia y Supervivencia del Cáncer de Pulmón en Chile: Desigualdades por Territorio y Previsión de Salud

Time: 09:30 – 09:45
Authors:

- Alarcón-Salvo, I. *(Universidad de Chile)*
- Mondschein-Prieto, S. *(Universidad de Chile)*
- Arancibia-Hernández, F. *(Instituto Nacional del Tórax)*
- Saavedra-Valenzuela, M. *(Instituto Nacional del Tórax)*

Budget-Constrained Optimal Cancer Screening with Risk Stratification: A Population-Based Modeling Approach

Susana Mondschein
Depto. Ingeniería Industrial
line 3: *name of organization (of Affiliation)*
Santiago, Chile
susana.mondschein@dii.uchile.cl

Felipe Subiabre
Depto. Ingeniería Industrial
Santiago, Chile
fsstol@gmail.com

Natalia Yankovic
ESE Business School
Universidad de los Andes
Santiago, Chile
nyankovic.ese@uandes.cl

***Abstract*— Traditional cancer screening policies often rely on prioritization indices that recommend specific testing regimens based on individual risk or population averages. However, these approaches can misalign with real-world conditions where healthcare systems face strict resource limitations and population heterogeneity in disease incidence. This work develops a novel optimization model that explicitly incorporates per-period budget constraints and stratified risk groups into the design of screening policies. By modeling disease evolution through continuous-time semi-Markov processes and characterizing the system at the population level, the model avoids purely heuristic prioritization and instead constructs policies that balance cost-effectiveness across all risk groups. The result is a framework that equalizes the marginal benefit per unit cost, offering a practical and analytically tractable alternative to simulation-based methods commonly used in health economics.**

We illustrate the framework using a case study inspired by breast cancer screening. Our findings show that the optimal policy assigns distinct testing schedules to each risk group while satisfying the same aggregate budget as the no-screening baseline. These policies lead to an 18.5% reduction in cancer-related mortality across the population. Additionally, even under implementation constraints—such as limiting the number of screening configurations or enforcing a single policy for the whole population—the model retains robust performance, underscoring its flexibility. This approach is especially relevant in public health contexts marked by financial constraints and demographic diversity, where decision-makers must allocate limited resources while ensuring equitable health outcomes.

Keywords—cancer screening, public health policy, cost-effectiveness, semi-Markov models, population optimization, risk stratification

I. INTRODUCTION

Health screening programs are essential tools for early detection and management of chronic conditions such as cancer. While numerous screening guidelines exist—often based on age thresholds or clinical risk indices—these are typically developed without fully accounting for budgetary limitations or variability across population segments [1, 2, 3]. Especially in resource-constrained settings, such simplifications can result in suboptimal or inequitable outcomes. This work introduces a population-level mathematical model that simultaneously considers disease risk heterogeneity and systemic resource constraints to derive optimal cancer screening policies.

II. BACKGROUND AND MOTIVATION

Most existing models in the literature adopt an individual-level perspective, relying on Markov Decision Processes (MDPs) or simulations. While these approaches provide insight into personal treatment pathways, they are limited in their scalability to population-wide decision-making. Our contribution addresses this gap by integrating a semi-Markov process to evaluate steady-state population outcomes and formulating the policy design problem as a multiple-choice knapsack problem (MCKP), with the aim of equating cost-effectiveness across risk groups.

III. MODEL FRAMEWORK

Our model tracks individuals transitioning through health states—from healthy to undiagnosed and treated cancer stages, ending in absorbing death states. The transitions depend on hazard rates that vary by age and treatment status. By embedding this individual dynamic into a population model with Poisson arrivals, we characterize long-run expected costs and benefits analytically. The screening policy is defined by age-dependent frequencies, constrained by an overall per-period budget [4, 5].

A. Optimization Methodology

We formulate the optimization as a Population-Based Optimization Model, where each risk group selects from a discrete set of candidate screening policies. The MCKP structure ensures that the optimal assignment maximizes overall expected health benefits subject to resource constraints. We demonstrate that the optimal policy vector nearly equalizes cost-effectiveness

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

ratios across all groups, representing an efficient and equitable use of available resources.

B. Case Study and Results

A case study based on breast cancer data segments the population into three risk groups and evaluates over 10,000 candidate screening configurations. The optimal solution specifies distinct screening thresholds and frequencies for each group and achieves a significant mortality reduction (18.5%) under the same total budget as the baseline (no screening). The algorithm used for policy evaluation exploits acyclic graph structures to achieve rapid computation times.

C. Policy Implications and Extensions

We explore two extensions: (1) reducing the number of allowable screening patterns, and (2) enforcing a uniform policy for all risk groups. The first maintains the model's key insights, while the second shows minimal degradation in overall performance, except in the highest-risk group. This highlights the relevance of identifying vulnerable subpopulations when designing public health interventions.

IV. CONCLUSIONS

This work provides a tractable, analytically grounded method for designing cancer screening policies that align with budgetary constraints and population risk heterogeneity. By replacing heuristics with optimization rooted in cost-effectiveness balance, the approach ensures equitable and efficient resource allocation. In our work, we propose a novel methodology that adopts a population-based perspective to identify optimal screening policies.

Key contributions of our research include:

- Analytical Characterization: We analytically characterize performance metrics traditionally addressed through simulation. This advancement offers a more precise understanding of the effectiveness of screening policies.
- Evaluation of Stationary Distributions and Expected Lifetimes: Our methodology includes efficient algorithms for evaluating stationary distributions and expected lifetimes in the discrete Markovian case, offering significant improvements over existing models.
- Practical Application: We demonstrate the applicability of our approach using a case study inspired by colorectal cancer (CRC) screening, highlighting the model's potential to improve screening practices and outcomes.

We believe that our research contributes significantly to healthcare operations management and offers valuable insights for practitioners and policymakers involved in designing and implementing screening policies.

REFERENCES

[1] O. Alagoz et al., "Operations Research Models for Cancer Screening," Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 2011.
[2] M.U.S. Ayvaci et al., "The effect of budgetary restrictions on breast cancer diagnostic decisions," M&SOM, 2012.
[3] I. Toumazis et al., "Risk-based framework for lung cancer screening," Cancer, 2021.
[4] W.L. Smith, "Regenerative stochastic processes," Proc. R. Soc. London A, 1955.
[5] H. Kellerer et al., "The Multiple-Choice Knapsack Problem," Springer, 2004.

Priorización de pacientes y programación de cirugías mediante herramientas de optimización y machine learning

Alexander Böhm Ghiringhelli
Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
aboehm@uc.cl

Jorge Vera Andreo
Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
jver@uc.cl

ABSTRACT Los sistemas de salud presentan grandes complejidades, debido a la interacción de muchos elementos, y grandes incertidumbres, entre otras, las relacionadas a la evolución de los pacientes. En Chile, esto es un problema público significativo debido a las largas listas de espera, particularmente en algunas áreas quirúrgicas. Las herramientas de la Investigación Operacional se han usado desde hace décadas en la optimización de sistemas hospitalarios, llevando a diversos problemas de optimización lineal, o entera y, muchas veces, bajo incertidumbre, Sin embargo, hoy pueden ser complementadas con herramientas modernas de Inteligencia Artificial y Machine Learning, las cuales ya han mostrado éxito en diversas áreas. En este trabajo mostramos el desarrollo de un sistema de optimización para la programación de operaciones en un hospital de la red pública de Chile, que toma en cuenta la incertidumbre en la duración de las intervenciones. Este sistema considera una priorización de pacientes en función de sus grupos GRD, los cuales son estimados mediante el uso de herramientas de LLM y Machine Learning que se aplican a las fichas digitalizadas de pacientes en las cuales hay información sobre los diagnósticos del paciente en formato de texto libre, el cual es interpretado por las herramientas de IA. Estos datos, después, alimentan un modelo de optimización entera bajo incertidumbre que produce la asignación. Los resultados preliminares son prometedores, lográndose buenas clasificaciones y programaciones de cirugías.

Palabras claves: Optimización en sistemas de salud, LLM en análisis de texto

Localización de centros de salud considerando vulnerabilidad social. Aplicación a un caso de estudio en la región de Valparaíso

1st Isis Barría-Fuentes
Mg. en Cs. de la Ing. m. Log. y G.O.
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
i.barrafuentes@uandresbello.edu

2nd Pamela C. Cisternas
Centro de Transporte y Logística
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
pamela.cisternas@unab.cl

3rd Armin Lüer-Villagra
Departamento de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Talcahuano, Chile
armin.luer@unab.cl

***Resumen*—Este estudio aborda la optimización de la localización de centros de salud en la Región de Valparaíso, Chile, integrando la vulnerabilidad social en el proceso de planificación territorial. Dada la alta exposición de Chile a desastres socio naturales, se propone un modelo de cobertura máxima que considera no solo la población total, sino también la población ponderada por el Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI). Los resultados demuestran cómo la inclusión de la vulnerabilidad social puede mejorar la accesibilidad a servicios de salud para las comunidades más vulnerables, lo cual es crucial para fortalecer la capacidad de respuesta y recuperación ante eventos disruptivos.**

***Index Terms*—localización, vulnerabilidad social, centros de salud**

I. Introducción

Chile se encuentra altamente expuesto a diversas amenazas naturales, principalmente debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, lo que hace que su población esté expuesta a sismos, tsunamis y erupciones volcánicas. A estas se suman otras amenazas asociadas al cambio climático, como incendios forestales, inundaciones, sequías, entre otras. La interacción de estas amenazas con las condiciones sociales, económicas y territoriales preexistentes da lugar a los desastres socio naturales, cuyos impactos no se distribuyen equitativamente entre la población. La vulnerabilidad social, entendida como las circunstancias de una persona o comunidad que afectan su capacidad para anticipar, enfrentar, reparar y recuperarse de los efectos de un evento disruptivo. [1]–[3]. Factores como la edad, el nivel socioeconómico, la condición de salud o el acceso a servicios básicos hacen que ciertos grupos sufran mayores consecuencias y enfrenten mayores dificultades en el proceso de recuperación luego de un evento. En este contexto, el acceso oportuno a centros de salud resulta fundamental, ya que estos cumplen un rol clave tanto en la respuesta inmediata como en la recuperación post-desastre. Este acceso adquiere una relevancia aún mayor para la población más vulnerable, dadas sus condiciones particulares. Sin embargo, la planificación territorial actual en Chile no ha incorporado la vulnerabilidad social como un criterio para la localización de estos servicios, lo cual puede influir en la resiliencia de aquellas comunidades más vulnerables.

II. Planteamiento del problema

Chile, por su ubicación geográfica, está expuesto a múltiples amenazas naturales, los cuales resultan en desastres socionaturales que afectan severamente a la población. La vulnerabilidad social agrava estos impactos, pues personas con características socioeconómicas, demográficas o físicas específicas enfrentan mayores dificultades para prepararse, responder y recuperarse de estos eventos. Ocurrido un desastre, las personas tienden a necesitar acudir a centros de salud, ya sea por situaciones anteriores al desastre o bien necesidades después de la ocurrencia de este, por ende, que los centros de salud estén localizados de manera estratégica podría influir positivamente en las comunidades más vulnerables. A pesar de la alta exposición a peligros naturales que por su geografía Chile posee, hasta la fecha la planificación territorial no incorpora directamente criterios de vulnerabilidad social para la localización de los centros de salud.

III. Cálculo de la vulnerabilidad social

Se estimó la vulnerabilidad social utilizando el 'Social Vulnerability Index' (SoVI por su sigla en inglés) desarrollado por [1]. El SoVI es un índice ponderado que utiliza datos censales para capturar diversos factores demográficos y socioeconómicos que contribuyen a la vulnerabilidad social. Mediante un análisis de componentes principales (ACP) en el Software IBM SPSS Statistics versión 30.0.0.0 (171) se obtuvieron los dominios de vulnerabilidad de la Región de Valparaíso y se visualizaron sus resultados especiales mediante el Software QGIS Desktop versión 3.42.2.

IV. Selección del Modelo de Localización

Se formuló un modelo matemático de localización de instalaciones de salud basado en un problema de cobertura máxima [4]. Este tipo de modelo fue elegido en base a la literatura en contextos sanitarios y su capacidad para maximizar la demanda cubierta dentro de una distancia o tiempo máximo

preestablecido, lo cual es crucial para garantizar el acceso a la salud en situaciones de desastre.

V. Diseño Experimental y Comparación de Modelos

Para evaluar el impacto de incorporar la vulnerabilidad social, se realizaron dos modelos de cobertura máxima mediante el lenguaje de programación Python y la API de Gurobi:

1. Modelo M1 (Tradicional): Considera la demanda como la población total, representando un enfoque de localización convencional.
2. Modelo M2 (Ponderado por SoVI): La demanda se pondera por el SoVI normalizado (entre 0 y 1), priorizando la cobertura de la población más vulnerable.

VI. Conclusiones

Observamos que el SoVI es una medida estable de análisis de vulnerabilidad social en distintas escalas territoriales en tres dominios: estatus socioeconómico, personas con discapacidad y población mayor.

De cara hacia los modelos de localización se observa que existen casos en que las ubicaciones sugeridas por los modelos difieren, priorizando áreas con mayor vulnerabilidad social, pero sin afectar mayormente la cantidad de población potencialmente atendidas por las nuevas instalaciones de salud.

Referencias

[1] S. L. Cutter, B. J. Boruff, and W. L. Shirley, "Social vulnerability to environmental hazards," *Social Science Quarterly*, vol. 84, no. 2, pp. 242–261, 2003.

[2] N. C. Bronfman, P. B. Repetto, N. Guerrero, J. V. Castañeda, and P. C. Cisternas, "Temporal evolution in social vulnerability to natural hazards in chile," *Natural Hazards*, vol. 107, pp. 1757–1784, 2021.

[3] S. L. Cutter, "The origin and diffusion of the social vulnerability index (sovi)," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 109, p. 104576, 2024.

[4] M. S. Daskin, *Introduction to Location Theory and Models*, ch. 1, pp. 1–28. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

Estimación de Incidencia y Supervivencia del Cáncer de Pulmón en Chile: Desigualdades por Territorio y Previsión de Salud

Alarcón Salvo Ignacio A.
dept. Ingeniería Civil Industrial
Universidad de Chile
Santiago, Chile
ialarcon@ug.uchile.cl

Mondschein Prieto Susana V.
dept. Ingeniería Civil Industrial
Universidad de Chile
Santiago, Chile
susana.mondschein@uchile.cl

Arancibia Hernández Francisco E.
dept. Oncología
Instituto Nacional del Tórax
Santiago, Chile
fearancibia@gmail.com

Saavedra Valenzuela María P.
dept. Oncología
Instituto Nacional del Tórax
Santiago, Chile
mp.saavedra.md@gmail.com

Keywords— Cáncer de pulmón, incidencia, mortalidad, supervivencia, egresos hospitalarios, Chile, desigualdades en salud, análisis regional, sistema de previsión, Kaplan-Meier

Objetivos: Desarrollar estimaciones de la incidencia, mortalidad y supervivencia del cáncer de pulmón en Chile a partir de egresos hospitalarios y defunciones, permitiendo caracterizar inequidades según región, sexo, grupo etario y tipo de previsión de salud, en el contexto de la ausencia de un registro nacional de cancer.

I. INTRODUCCIÓN

El cáncer de pulmón es una de las principales causas de muerte por cáncer tanto a nivel mundial como en Chile, presentando altas tasas de mortalidad y baja supervivencia. A pesar de su impacto en salud pública, Chile no cuenta con un registro nacional de cáncer que permita cuantificar de forma precisa su incidencia, lo cual es preocupante dado el impacto que tiene este cáncer. En este contexto, esta tesis tiene como objetivo principal estimar la incidencia, mortalidad y supervivencia del cáncer de pulmón en el país a partir de registros administrativos disponibles, evaluando además las inequidades en estos indicadores según edad, sexo, región y tipo de previsión de salud (FONASA vs ISAPRE). Asimismo, se comparan las estimaciones con los registros poblacionales disponibles en cuatro regiones de Chile, a fin de validar la metodología aplicada.

II. METODOLOGÍA

Se utilizaron bases de datos anonimizadas del Departamento de Estadísticas e Información de Salud (DEIS) que incluyen egresos hospitalarios (2001–2020) y defunciones (2001–2018) (Dada la diferencia en años de ambas bases, se decidió realizar el análisis hasta el 2018). A través de un proceso de depuración y clasificación de pacientes basado en códigos CIE10, se identificaron aquellos casos incidentes y fallecimientos atribuibles al cáncer de pulmón. Para cada paciente se construyó una base auxiliar con variables clínicas, demográficas y territoriales. Se calcularon tasas crudas y ajustadas por edad de incidencia y mortalidad, desagregadas por región, sexo, edad y previsión.

La población de referencia se estimó a partir de los datos de la Encuesta CASEN, donde para los años faltantes, se realizó una regresión lineal entre los años en que si se contaba con la información para estimar los valores por rango etario, sexo, region de residencia y previsión de salud. Además, se aplicó un análisis de supervivencia mediante curvas de Kaplan-Meier y un modelo de riesgos proporcionales de Cox, considerando censura para casos sin registro de defunción. Finalmente, se compararon las tasas estimadas con los datos de los registros poblacionales de cáncer disponibles en cuatro regiones (Arica, Antofagasta, Del Maule, Los Ríos).

III. RESULTADOS

Se identificaron 40.828 pacientes clasificados como incidentes de cáncer de pulmón. Las tasas de incidencia ajustadas por edad muestran un patrón creciente en mujeres en el periodo analizado, mientras que en hombres tienden a estabilizarse o disminuir ligeramente. Las tasas de mortalidad siguen una tendencia similar. Se evidencian disparidades importantes según previsión de salud: los pacientes pertenecientes a FONASA presentan mayores tasas de incidencia y mortalidad en comparación con ISAPRE, lo que sugiere inequidades en el acceso a diagnóstico y tratamiento, considerando que gran parte de las incidencias son pacientes que no tienen egresos hospitalarios previos por pulmón, pero que se les identificó por el código de defunción. Territorialmente, regiones como Antofagasta y Biobío presentan tasas elevadas, posiblemente vinculadas a exposiciones ambientales históricas. La comparación con registros poblacionales mostró en general una sobreestimación moderada de los casos, con diferencias promedio inferiores al 10% en la mayoría de los territorios. El análisis de Kaplan-Meier mostró una supervivencia a 5 años inferior al 15%, coherente con diagnósticos tardíos (estadio III o IV en la mayoría de los casos).

IV. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que, en ausencia de un registro nacional de cáncer, es factible utilizar registros de egresos nacionales para generar estimaciones razonables de la carga del cáncer de pulmón en Chile. La metodología desarrollada permite identificar casos incidentes, estimar tasas de mortalidad y evaluar la supervivencia de forma desagregada

por sexo, región y previsión de salud, utilizando datos disponibles públicamente. Los resultados evidencian marcadas desigualdades sociales, donde los pacientes del sistema público de salud presentan tasas más altas de incidencia y mortalidad, así como menor supervivencia esperada, en comparación con quienes pertenecen al sistema privado. Estas diferencias podrían estar asociadas con el acceso al diagnóstico temprano, tratamiento oportuno y continuidad del cuidado del cáncer.

Adicionalmente, el análisis territorial revela disparidades regionales relevantes que pueden estar asociadas a determinantes sociales y ambientales, como la exposición histórica a contaminantes en zonas del norte del país. La evidencia reunida sugiere que el cáncer de pulmón no solo es una emergencia sanitaria, sino también un reflejo de la desigualdad social en salud en Chile.

La metodología utilizada es replicable y podría extenderse a otros tipos de cáncer u otras enfermedades de alto impacto. Los hallazgos refuerzan la necesidad urgente de implementar un registro nacional de cáncer, así como de diseñar políticas públicas que apunten al fortalecimiento del diagnóstico precoz, el acceso equitativo al tratamiento y la prevención del tabaquismo, especialmente en grupos sociales más vulnerables.

V. BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

[1] World Health Organization (WHO), “Cancer,” 2021. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer.

[2] J. Ferlay, M. Ervik, F. Lam, M. Colombet, L. Mery, M. Piñeros, et al., *Global Cancer Observatory: Cancer Today*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, 2020. [Online]. Available: https://gco.iarc.fr/today.

[3] Departamento de Epidemiología, *Segundo informe nacional de vigilancia de cáncer en Chile. Estimación de Incidencia*. Ministerio de Salud, Santiago de Chile, 2019. [Online]. Available: http://epi.minsal.cl/mortalidad-incidencia-y-sobrevida-de-cancer/

[4] Ministerio de Desarrollo Social y Familia, *Síntesis de Resultados Casen 2017: Salud*. Gobierno de Chile, Santiago, 2017. [Online]. Available: http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2017/Resultados_Salud_casen_2017.pdf.

[5] B. Madariaga, S. Mondschein, and S. Torres, “Breast cancer trends in Chile: Incidence and mortality rates (2007–2018),” *PLOS ONE*, vol. 17, no. 7, e0271929, Jul. 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271929.

[6] S. Mondschein, F. Subiabre, N. Yankovic, C. Estay, C. Von Mühlenbrock, and Z. Berger, “Colorectal cancer trends in Chile: A Latin-American country with marked socioeconomic inequities,” *PLOS Global Public Health*, vol. 2, no. 6, e0001322, Jun. 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0001322

Session N°9 – Track N°3

Vehicle Routing Problem (VRP)

Chair: Cortés-Carrillo, C. *(Universidad de Chile)*
Place: G6-056
Time: 08:30 – 09:45

Análisis de Rutas para Drones de Vigilancia Usando Maximum Scatter Colored TSP y Técnicas de Clustering

Time: 08:30 – 08:45
Authors:

- Olmedo, J. *(Universidad Andrés Bello)*
- Barrientos, N. *(Universidad Andrés Bello)*
- Morillo-Torres, D. *(Pontificia Universidad Javeriana)*
- Linfati, R. *(Universidad del Bío-Bío)*
- Gatica, G. *(Universidad Andres Bello)*

Estudio Experimental de Transporte de Carga Bidimensional con Rutas Fijas

Time: 08:50 – 09:05
Authors:

- Morandé, J. *(Auburn University)*
- Pina-Pardo, J. *(Massachusetts Institute of Technology)*
- Vélez-Gallego, M. *(Universidad EAFIT)*
- Silva, D. *(Auburn University)*
- Smith, A. *(Auburn University)*

Algoritmo Basado en Generación de Columnas para la Planificación Semanal de Viajes con Flota Dedicada y Full Truck Load

Time: 09:10 – 09:25
Authors:

- Sandoval-Mondaca, M. *(Universidad De Chile)*
- Cortés-Carrillo, C. *(Universidad de Chile)*
- Rey, P. *(Universidad Tecnológica Metropolitana)*
- Wickert, T. *(Mercado Livre - Brasil)*

Diseño de un Modelo de Rutas para Logística Inversa de Llantas

Time: 09:30 – 09:45
Authors:

- Sanchez-Meneces, W. *(Universidad Privada Boliviana)*
- Da Silva-Ovando, A. *(Universidad Privada Boliviana)*

Análisis de Rutas para Drones de Vigilancia Usando Maximum Scatter Colored TSP y Técnicas de Clustering

1st Juan Pablo Olmedo
Facultad de Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago de Chile, Chile
j.olmedosaavedra@uandresbello.edu

2nd Nicolás Barrientos
Facultad de Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago de Chile, Chile
n.barrientossabaleta@uandresbello.edu

3rd Daniel Morillo-Torres
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Cali, Colombia
daniel.morillo@javerianacali.edu.co

4th Rodrigo Linfati
Department of Industrial Engineering
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
rlinfati@ubiobio.cl

5th Gustavo Gatica
Facultad de Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago de Chile, Chile
ggatica@unab.cl

***Abstract*—El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) en tareas de vigilancia ha ganado relevancia por su capacidad de cubrir grandes áreas con rapidez y eficiencia. No obstante, la planificación de rutas para múltiples drones representa un desafío computacional, especialmente cuando se busca maximizar la cobertura espacial mientras se visitan puntos críticos específicos. En este trabajo se propone un enfoque híbrido que combina técnicas de clustering con el modelo Maximum Scatter Colored Traveling Salesman Problem (MSCTSP). En una primera fase, se aplica clustering para asignar subconjuntos de ciudades a cada dron, reduciendo la complejidad del problema y favoreciendo el balance de carga. Posteriormente, se resuelve cada subproblema mediante MSCTSP, maximizando la dispersión entre los puntos visitados. La calidad de las rutas se mejora mediante un procedimiento de búsqueda local. Se presentan experimentos sobre instancias simuladas, mostrando que la propuesta permite obtener rutas dispersas y eficientes, lo cual resulta adecuado para misiones de vigilancia multi-UAV. Este enfoque demuestra ser escalable y adaptable a distintas configuraciones operativas.**

***Index Terms*—clustering, planificación de rutas, travelling salesman problem, UAV, scatter.**

I. Introducción

En el contexto de vigilancia, la existencia de vehículos aéreos no tripulados (drones, UAVs) presentan una nueva herramienta con alto potencial. Su alta movilidad permite cubrir extensas superficies en menor tiempo y costo que otras alternativas [1].

Diversos estudios han analizado el empleo de drones para protección, vigilancia e incluso operaciones de búsqueda y rescate, destacando ventajas como reducción de costos y tiempos de respuesta [2]. Sin embargo, la vigilancia aérea plantea desafíos importantes: limitaciones de autonomía, necesidad de cobertura amplia, aspectos climatológicos, restricciones regulatorias y complejidad en la planificación de rutas. Esta última se puede estudiar como un problema NP-Hard semejante al Problema del Vendedor Viajero (TSP), en el cual se cuenta con puntos que deben ser recorridos en un ciclo Hamiltoniano, buscando el ciclo de menor costo. El TSP puede ser modificado por restricciones adicionales según las condiciones de borde del problema de cobertura. En este trabajo, se propone una aproximación basada en el Maximum Scatter Colored TSP (MSCTSP) (3), una extensión del TSP que permite un escenario con múltiples trabajadores, los cuales cuentan con nodos distribuidos entre aquellos con accesos compartidos, y otras con accesos restringidos. Se busca maximizar la dispersión dentro del recorrido, con tal de aumentar la superficie cubierta. Dentro del MSCTSP, una de las tareas que se debe realizar es asignar los accesos exclusivos. Proponemos aplicar una fase previa de descomposición mediante clustering antes de aplicar MSCTSP, permitiendo agrupar las ciudades en subconjuntos balanceados, reduciendo la complejidad y favoreciendo soluciones más eficientes, para evitar cruces en las rutas de dos drones distintos.

Los resultados se compararán con aquellos obtenidos por el estudio realizado por Dong et al. [3], utilizando las instancias propuestas para simular el escenario planteado. Se evaluará dispersión, cobertura y eficiencia computacional.

II. Trabajos Relacionados

A. UAVs en Vigilancia

En la literatura, es posible encontrar varios ejemplos del uso de UAVs para protección y vigilancia, en particular en el sector militar. Los drones permiten acceder zonas peligrosas o difíciles de alcanzar sin tener que poner en peligro a un piloto [6].

En escenarios de vigilancia, los UAVs deben recorrer puntos estratégicos o regiones críticas para perseguir una cobertura espacial adecuada. Este problema está estrechamente relacionado

con la planificación eficiente de rutas, es decir, un problema NP-Hard, y que comúnmente se aborda mediante variantes del Problema del Viajante (TSP) o el Problema de Rutas de Vehículos (VRP) adaptadas para UAVs (7). La mayoría de las investigaciones se enfocan en minimizar la distancia recorrida hacia los puntos, o el tiempo de misión. Sin embargo, no se consideran métricas de dispersión espacial para dar cobertura, dejando esta tarea en manos de la planificación de puntos críticos. En este trabajo, se propone introducir un enfoque dirigido a maximizar la dispersión entre los puntos visitados mediante el modelo de Maximum Scatter Colored TSP, con el objetivo de poder aumentar la superficie cubierta por el dron durante su recorrido, y así aprovechar para entregar mas cobertura mientras se mueve entre nodos.

B. MSCTSP

MSCTSP [3] extiende a mTSP [4] y mTSP* [5]. El primero introduce el concepto de contar con más de un viajero para realizar el recorrido, mientras que el segundo introduce el concepto de colores (categorías). En su trabajo, Dong et al. [3] proponen incrementar la dispersión entre los puntos de la ruta, distribuyendo las visitas lo más posible en el espacio y evitando rutas que concentren puntos muy cercanos entre sí. Se propone que esto puede tener aplicaciones en los sectores de vigilancia, monitoreo y patrullaje, donde no basta con solo visitar todos los puntos, sino que también se busca cubrir la mayor área posible en cada recorrido para incrementar la probabilidad de detección de eventos, intrusiones o anomalías. Si los puntos visitados quedan demasiado cerca, grandes áreas quedarán desatendidas. Al maximizar la distancia mínima como se propone, se asegura que los puntos seleccionados se distribuyan uniformemente, para mejorar la cobertura global.

El problema se define a partir de m viajeros que deben recorrer n ciudades. Se define además un grafo completo dirigido $G = (V, E)$, donde el conjunto de vértices V representa a las ciudades, tal que $V = \{0, 1, \ldots, n-1\}$, y el conjunto E representa todas las aristas (i, j), tales que $i \neq j$. Cada arista cuenta con un peso asociado $\omega_{i,j}$, dado por la distancia entre dos ciudades. El conjunto de ciudades se subdivide en conjuntos: un conjunto U, indicando ciudades compartidas, y en k conjuntos V_k, indicando las ciudades exclusivas asignadas al trabajador k, con $k \in Z_m = \{1, 2, \ldots, m\}$. Los viajeros solamente pueden ingresar a ciudades compartidas, o ciudades asignadas a ellos. Se cuenta también con un nodo identificado como "depósito" d, del cual todos los trabajadores parten y terminan sus recorridos. Por lo tanto, la ruta para el trabajador k está dada por $R_k = (d, v_{k,1}, v_{k,2}, \ldots, v_{k,p_k}, d)$. El objetivo de MSCTSP es maximizar la dispersión, a través de maximizar el tamaño del eje mínimo de todos los ejes recorridos:

$$Máx\ f = min_{(i,j)\in \text{rutas}}\, \omega_{i,j} \tag{1}$$

Esta función está asociada a las restricciones tradicionales de un TSP, extendidas a viajeros múltiples. Estas serían: cada viajero parte y termina en el depósito, y cada ciudad es visitada solamente una vez. Adicionalmente, se cuenta con una restricción restringiendo el acceso de las ciudades solamente a sus viajeros asignados.

C. Clustering Aplicado sobre mTSP

En problemas de planificación de rutas con múltiples vehículos, como el mTSP, una estrategia común para reducir la complejidad computacional y mejorar la calidad de las soluciones consiste en aplicar técnicas de clustering para dividir el conjunto de nodos en subconjuntos que posteriormente son asignados a cada agente [7], [8]. Luego, se puede aplicar TSP sobre cada cluster individual para encontrar cada solución local, resultando en una solución general.

La mayoría de los trabajos enfocados en clustering para mTSP priorizan la minimización de distancia total, sin considerar métricas adicionales como la dispersión espacial entre puntos visitados. Se persigue aplicar esta metodología sobre MSCTSP. En este último, es muy común encontrar cruces entre las rutas de los viajeros, y en los resultados presentados por Dong et al. [3], muchas veces resultan en costos totales elevados, debido a que no está la métrica. Se espera que al aplicar clustering sobre MSCTSP se pueda cubrir esta brecha en el costo, resultando en soluciones que permitan una buena cobertura combinada con un costo razonable.

En la Figura 1, se puede observar un ejemplo de resolución de un MSCTSP. Como se mencionó, existe una cantidad elevada de cruce entre las rutas de viajeros. En la Figura 2, se muestra un mTSP sobre el cual se aplicó clustering previamente. De manera esperable, cuenta con espacios vacíos no cubiertos durante el recorrido, los cuales en un escenario de vigilancia presentarían posibles vulnerabilidades.

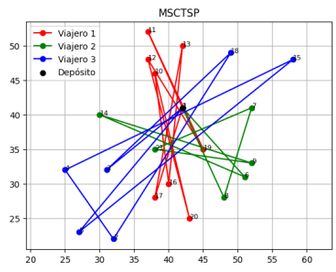


Fig. 1. Ejemplo de un MSCTP consistido por 22 nodos y 3 viajeros.

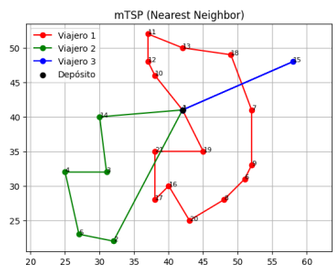


Fig. 2. mTSP* con clustering previo.

III. Propuesta: MSCTSP con Clustering Previo

La planificación de rutas para múltiples drones en misiones de vigilancia presenta retos complejos: es necesario garantizar que se visiten todos los puntos críticos, y se debe maximizar la cobertura espacial para aumentar la efectividad de la vigilancia. Adicionalmente, no siempre es razonable elegir una solución de costo elevado. Se busca una solución alternativa propuesta por el MSCTSP tradicional, que logre un balance entre cobertura y costo.

Para abordar esta complejidad, se propone una metodología basada en dos fases complementarias. Una primera fase de clustering, en la cual se distribuyen las ciudades compartidas entre los trabajadores, con el objetivo de reducir la complejidad del problema al reducirlo en instancias pequeñas, lograr una distribución equitativa de tareas. Se busca también minimizar los cruces entre trabajadores distintos. Una vez definidas las particiones, la segunda fase considera la resolución de cada clúster de nodos a través de MSCTSP, aplicando el modelo con tal de maximizar la dispersión, y por consiguiente, la superficie cubierta dentro de cada clúster.

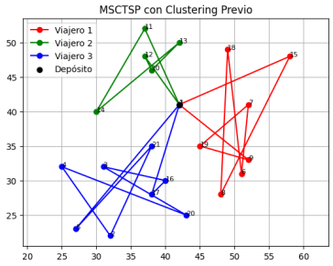


Fig. 3. Modelo propuesto aplicado a la configuración de nodos vistas en Fig. 1 y Fig. 2.

Esta combinación de técnicas aprovecharía las fortalezas de ambos enfoques: clustering reduciría la complejidad y permite un escalamiento eficiente en escenarios multi-drone, y MSCTSP introduce un criterio adicional orientado a maximizar cobertura, que típicamente no es considerado en enfoques convencionales de TSP/mTSP.

Se evaluarán distintos métodos de clustering sobre las instancias revisadas en el trabajo de Dong [3], priorizando métodos que han demostrado resultados sobre mTSP, tales como HAC (utilizado en el trabajo de Agárdi y Kovács [10]), buscando generar clusters que generen una distribución equitativa del trabajo y que eviten los cruces innecesarios (medido por índice de Davies-Bouldin). Los resultados obtenidos se compararán con aquellos obtenidos por el MSCTSP, evaluando tiempo de cómputo, GAP entre valores, y el mejor valor conocido a la fecha. Adicionalmente, buscaremos comparar la cobertura realizada sobre la superficie. Para esto, se utilizará el algoritmo de líneas de Bresenham para rasterizar el grafo con las rutas generadas, y determinar cuántas veces, y qué viajero está pasando por cada punto.

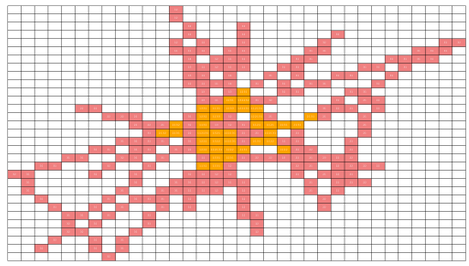


Fig. 4. Matriz de Cobertura de Fig. 1 (MSCTSP Base)

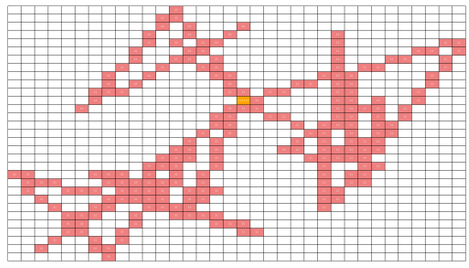


Fig. 5. Matriz de Cobertura de Fig. 3 [MSCTSP + Clustering]

Referencias

[1] Adorni, E., Rozhok, A., Revetria, R., & Ivanov, M. (2021, October). Literature review on drones used in the surveillance field. In Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (pp. 20-22).J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

[2] Bisio, Igor & Garibotto, Chiara & Lavagetto, Fabio & Sciarrone, Andrea & Zappatore, Sandro. (2018). Blind Detection: Advanced Techniques for WiFi-Based Drone Surveillance. IEEE Transactions on Vehicular Technology. PP. 1-1. 10.1109/TVT.2018.2884767.

[3] Xueshi Dong, Qing Lin, Wei Wang, Hybrid ITÖ Algorithm for Maximum Scatter Colored Traveling Salesman Problem, The Computer Journal, Volume 67, Issue 6, June 2024, Pages 2172–2188.

[4] T. Bektas. The multiple traveling salesman problem: An overview of formulations and solution procedures. Omega, vol. 34, no. 3, pp.209-219, 2006.

[5] Li, J., Qiru, S., Zhou, M., and Dai, A new multiple traveling salesman problem and its genetic algorithm-based solution. In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, Manchester, U.K: IEEE., 13–16 October, pp.1–6, IEEE, Piscataway, NJ, 2013.

[6] Shetty, Sanath & S, Santhosh & M.A., Dinesh. (2018). Development of an Autonomous Drone for Surveillance Application.

[7] Ding, G., Wu, Q., Zhang, L., Lin, Y., Tsiftsis, T., & Yao, Y.-D. (2018, January). An Amateur Drone Surveillance System Based on the Cognitive Internet of Things. IEEE Communications Magazine, 56(1), 29-35.

[8] Lu, Zhanqing & Zhang, Kai & He, Juanjuan & Niu, Yunyun. (2016). Applying K-means Clustering and Genetic Algorithm for Solving MTSP. 278-284.

[9] Chen, G., Cai, Y., Lu, G., Xie, Y., Dong, F., Chen, K. (2025). A Heuristic Algorithm for Solving the MTSP Problem Based on DBSCAN Clustering Algorithm and CNGA Algorithm. In: Liu, W., Wang, Q., Feng, J., Zhang, W. (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers of Electronics, Information and Computation Technologies (ICFEICT 2024). ICFEICT 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1414. Springer, Singapore.

[10] Agárdi, Anita & Kovács, László. (2019). Clustering-Based Optimisation of Multiple Traveling Salesman Problem. Production Systems and Information Engineering. 8. 89-100. 10.32968/psaie.2019.006.

Estudio experimental de transporte de carga bidimensional con rutas fijas

1st Juan Pablo Morandé
Department of Industrial and Systems Engineering
Auburn University
Auburn, USA
jpm0112@auburn.edu

2nd Juan C. Pina-Pardo
Escuela de Ingeniería Industrial
Pontifica Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
juan.pina@pucv.cl

3rd Mario C. Vélez-Gallego
Area de Computación y Analítica
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia
marvelez@eafit.edu

4th Daniel F. Silva
Department of Industrial and Systems Engineering
Auburn University
Auburn, USA
silva@auburn.edu

5th Alice E. Smith
Department of Industrial and Systems Engineering
Auburn University
Auburn, USA
smithae@auburn.edu

***Abstract*— El transporte de carga constituye un elemento esencial en las cadenas de suministro a nivel global. La eficiencia y la puntualidad en este rubro determinan en gran medida el éxito de un sistema logístico. En este contexto, este trabajo explora un problema de carga de vehículos bidimensional con vehículos heterogéneos, en el cual productos rectangulares son colocados en una flota de camiones que difieren en tamaño y número de niveles. Para resolver este problema, se propone un esquema jerárquico de dos fases. En cada fase, un modelo de optimización es formulado y resuelto para mejorar las decisiones de carga en los camiones a lo largo de rutas preestablecidas. La metodología fue evaluada con un caso de estudio basado en una compañía de ensamble de motocicletas en Colombia. Si bien el problema se plantea desde este caso de estudio, la metodología puede aplicarse en escenarios de transporte similares, como la distribución de electrodomésticos o materiales de construcción. Los resultados muestran que el uso del espacio bidimensional de los camiones incrementa, en promedio, un 1,73% la cobertura de demanda respecto al modelo unidimensional equivalente. Estos resultados evidencian el valor del enfoque bidimensional para modelar y planificar el transporte de carga con flotas heterogéneas.**

Keywords*— *problema de carga de vehículos, descomposición, problema de empaquetamiento bidimensional, restricciones de plazo de entrega.

Algoritmo basado en generación de columnas para la planificación semanal de viajes con Flota Dedicada y Full Truck Load

Mitchelle Sandoval Mondaca
Departamento de Ingeniería Civil Industrial
Universidad De Chile
Santiago, Chile
mitchelle.sandoval@gmail.com

Cristián Cortés Carrillo
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile
Santiago Chile
ccortes@ing.uchile.cl

Pablo Rey
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile
Santiago, Chile
prey@utem.cl

Toni Ismael Wickert
Mercado Livre
São Paulo, Brasil
toni.wickert@mercadolivre.com

***Abstract*—This work presents a mathematical model based on Mixed-Integer Programming and column generation to optimize freight planning by transitioning from a pure Full Truckload (FTL) strategy to a hybrid scheme with dedicated fleets. The model consolidates routes to reduce costs and improve efficiency, incorporating realistic operational constraints to ensure practical feasibility.**

I. Introducción

La gestión eficiente del transporte de mercancías es clave para la competitividad en logística. Actualmente, muchas empresas emplean principalmente la modalidad Full Truckload (FTL), donde cada viaje es contratado de forma individual, lo que puede implicar altos costos operacionales y baja eficiencia en el uso de recursos. Frente a esto, surge como alternativa la planificación mediante flotas dedicadas, permitiendo consolidar múltiples viajes en rutas optimizadas. El presente estudio propone un modelo matemático robusto basado en programación entera mixta (MIP), empleando generación de columnas, para facilitar la transición desde la operación exclusiva en FTL hacia una estructura combinada con flotas dedicadas, buscando maximizar la eficiencia operativa y reducir costos totales. El enfoque metodológico integra restricciones operacionales realistas, asegurando la viabilidad práctica del modelo propuesto.

II. Objetivo general y conceptos claves

El objetivo general de este trabajo es diseñar e implementar un modelo matemático y computacional que resuelva el Problema de Ruteo y Programación Semanal de Vehículos con Horarios de Salida Exactos y Restricciones de Jornada de Conductores, con el fin de minimizar los costos operacionales y detectar nuevas rutas eficientes que puedan ser implementadas en la operación de Flota Dedicada.

Este problema corresponde a una variación del clásico Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) originalmente introducido por Dantzig y Ramser [1]. En particular, la variante abordada incorpora ventanas temporales exactas, planificación semanal de itinerarios y restricciones laborales específicas de los conductores [2]. En este contexto, la técnica de descomposición mediante generación de columnas se ha consolidado como un método eficaz para abordar su alta complejidad, destacándose especialmente en revisiones metodológicas recientes [3].

En este trabajo, un circuito se define como un conjunto de itinerarios que, durante una semana, permite a uno o más vehículos realizar secuencias factibles de viajes previamente definidos. Cada circuito debe ser cerrado, es decir, comenzar y finalizar en un mismo nodo geográfico, respetando estrictamente las ventanas de salida, las capacidades máximas de carga (28 pallets por vehículo) y la normativa vigente en cuanto a tiempos de conducción y descansos según la cantidad de conductores asignados.

Dado que la cantidad de posibles circuitos es exponencial respecto al número de viajes, se recurre a una formulación por generación de columnas. En esta, el problema maestro se resuelve iterativamente, incorporando columnas (circuitos) que representan soluciones factibles y económicamente atractivas.

III. Formulación matemática del problema

A. Problema maestro

El problema maestro tiene como objetivo seleccionar la combinación óptima de circuitos de transporte utilizando

flotas dedicadas y definir qué viajes específicos continúan realizándose mediante modalidad Full Truckload (FTL), minimizando así los costos operacionales totales. Este modelo considera costos asociados a la activación de circuitos, la operación en modalidad FTL y restricciones operacionales claves, tales como la cobertura completa de viajes agrupados por origen, destino y horario, y capacidad de carga de camiones.

1) Función Objetivo del PM:

$$\min \sum_{v \in V} \left(\text{cost}_\text{v}\right) x_v + \sum_{k \in K} \left(\text{cost}_k^{FTL}\right) w_k^{FTL} \quad (1)$$

2) Restricciones:

$$\sum_v (A_{k,v} \cdot x_v) - 4 \cdot z_{g(k)} \leq 0 \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$z_{g(k)} - \sum_v A_{k,v} \cdot x_v \leq 0 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$-(\sum_v A_{k,v} \cdot x_v) - w_k^{FTL} \leq -CAM_k \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$x_c, y_k \in \{0,1\}, \quad w_k^{\text{FTL}} \geq 0. \quad (5)$$

Cada circuito puede estar compuesto por uno o más camiones, los cuales pueden tener distintos puntos de partida y retorno, siempre que respeten las reglas de completitud semanal. Asimismo, se introduce una restricción de unicidad por grupo de viajes, forzando que todos los viajes con igual origen, destino y hora de salida sean enviados juntos en un único circuito o en FTL. Luego de definir formalmente las restricciones del problema maestro, es posible interpretarlas en tres bloques funcionales: (i) las restricciones de cobertura aseguran que todos los viajes pertenecientes a un mismo grupo se asignen en conjunto, evitando particiones inconsistentes ((2) y (3)); (ii) las restricciones de suficiencia de camiones garantizan que la cantidad total de camiones asignados (vía flota dedicada o FTL) sea suficiente para cubrir la demanda logística de cada viaje (4); y (iii) las restricciones de dominio aseguran la consistencia lógica y factibilidad computacional del modelo, definiendo el espacio admisible de las variables involucradas (5).

B. Subproblema de generación de columnas

El subproblema se encarga de generar nuevos itinerarios de transporte factibles y atractivos para ser incorporados al problema maestro. La generación de columnas, técnica introducida originalmente por Dantzig y Wolfe [5], se ha consolidado como un enfoque estándar en problemas de ruteo y transporte, especialmente en contextos con ventanas temporales y restricciones operativas, tal como se detalla en [6]. Esta técnica se basa en la resolución iterativa de un problema de camino mínimo sobre un grafo dirigido acíclico (DAG), construido específicamente para representar las decisiones de secuenciación y cumplimiento operativo.

Cada nodo del grafo representa una decisión de realizar un viaje específico, mientras que los arcos representan posibles transiciones temporales factibles entre viajes consecutivos. Se construyen tres grafos distintos, uno para cada modalidad de conducción: camiones con uno, dos o tres conductores. Los grafos correspondientes a uno y dos conductores se construyen a partir de una red extendida, donde cada nodo contiene una condición binaria que representa el cumplimiento de las restricciones regulatorias impuestas. En cambio, el grafo de tres conductores no impone restricciones adicionales y se genera sin condiciones internas, pues representa el caso más flexible pero más costoso.

Las condiciones operacionales consideradas para cada modalidad son las siguientes:

1) Grafo 1 conductor:
   - Debe existir un bloque de 11 horas consecutivas de descanso dentro de cada ventana de 24 horas.
   - No se permite exceder las 12 horas continuas de trabajo.
   - Debe existir al menos un bloque de 35 horas consecutivas de descanso durante la semana.
2) Grafo 2 conductores:
   - Se requiere la existencia de un bloque continuo de 16 horas sin conducción dentro del itinerario semanal.
3) Grafo 3 conductores:
   - No existen restricciones adicionales; esta modalidad se aplica cuando las anteriores no pueden cumplirse.

Cada grafo incorpora estas condiciones en su estructura y se resuelve de forma independiente mediante un algoritmo eficiente de camino más corto basado en ordenamiento topológico. Finalmente, se selecciona e incorpora al problema maestro aquella columna que presenta el menor costo reducido negativo, reflejando un potencial de ahorro respecto a la operación base en FTL.

1) Función Objetivo del Subproblema:

$$\text{ReducedCost}(v) = \text{Cost}_v - \sum_{k \in v} \lambda^1_{g(k)} + \sum_{k \in v} \lambda^2_{g(k)} + \sum_{k \in v} \pi_k \quad (6)$$

La función objetivo del subproblema busca minimizar el costo total de operar un itinerario semanal de camión, considerando tres componentes: (i) el costo por distancia recorrida en viajes con carga, (ii) el costo asociado a los desplazamientos en vacío entre viajes consecutivos y al retorno al origen, y (iii) el costo laboral correspondiente al número de conductores requeridos para ejecutar el itinerario. A estos se restan los valores duales obtenidos del problema maestro, que reflejan los beneficios marginales de cubrir ciertos viajes y cumplir restricciones operativas, permitiendo así evaluar el costo reducido de cada columna generada.

C. Algoritmo utilizado para DAG

Para resolver el subproblema de generación de columnas, se utiliza un algoritmo de caminos más cortos en grafos

dirigidos acíclicos (DAG), basado en el orden topológico de los nodos. Esta técnica permite obtener el camino de menor costo reducido desde un nodo de origen ficticio hasta un nodo de destino ficticio en tiempo lineal $\mathcal{O}(|V| + |A|)$, donde V es el conjunto de nodos y A el conjunto de arcos del grafo [4].

El algoritmo comienza ordenando topológicamente los vértices y luego recorre el grafo en dicho orden, relajando los arcos salientes de cada nodo. Esto garantiza que cada vértice se procese solo una vez y que no existan ciclos negativos, asegurando así la optimalidad del camino identificado. Esta estrategia es especialmente eficiente en este contexto, ya que la factibilidad operacional (restricciones de tiempo, descansos, etc.) está incorporada en la construcción previa del grafo.

IV. Resultados preliminares

Se evaluaron distintas instancias representativas compuestas por cientos de viajes, los cuales inicialmente eran cubiertos en su totalidad bajo la modalidad FTL. Tras aplicar la metodología de generación de columnas, se logró reconfigurar el 70% de los viajes hacia flotas dedicadas, lo que permitió una reducción aproximada del 21,9% en los costos logísticos. Estos resultados evidencian el potencial del modelo propuesto para reemplazar gran parte de la operación actual por soluciones más eficientes, sin comprometer la factibilidad operativa de los itinerarios generados.

References

[1] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.

[2] G. Laporte, "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms," *European Journal of Operational Research*, vol. 59, no. 3, pp. 345–358, 1992.

[3] D. Feillet, "A tutorial on column generation and branch-and-price for vehicle routing problems," *4OR*, vol. 8, no. 4, pp. 407–424, 2010.

[4] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, "Single-source shortest paths in directed acyclic graphs," in *Introduction to Algorithms*, 3rd ed., MIT Press, 2009, ch. 24, pp. 655–657.

[5] G. B. Dantzig and P. Wolfe, "Decomposition principle for linear programs," *Operations Research*, vol. 8, no. 1, pp. 101–111, 1960.

[6] G. Desaulniers, J. Desrosiers, and M. M. Solomon (Eds.), *Column Generation*, Springer, 2005.

DISEÑO DE UN MODELO DE RUTAS PARA LOGÍSTICA INVERSA DE LLANTAS

Wilmer Sanchez Meneces
Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas
Universidad Privada Boliviana
Cochabamba, Bolivia
wilmersanchez1@upb.edu

Agatha Clarice da Silva Ovando
Centro de Operaciones Logísticas
Universidad Privada Boliviana
Cochabamba, Bolivia
agathadasilva@upb.edu

Resumen*—La gestión inadecuada de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU) en Colcapirhua, Cochabamba, causa daños ambientales y riesgos sanitarios debido a su acumulación en vertederos y espacios públicos. Este estudio desarrolla un modelo logístico integrado para la recolección inversa de NFU, fusionando Sistemas de Información Geográfica (SIG) en QGIS, técnicas de agrupación y optimización de rutas mediante el Vehicle Routing Problem (VRP). Se georreferenciaron 50 lugares generadores de NFU, segmentados en cinco conjuntos, determinando cinco rutas para recolectar 248 NFU diarios con tiempos de servicio de 209 a 295 minutos por ciclo, utilizando camiones Sinotruk Howo (56 llantas por viaje). El costo unitario es de 0.36 USD por llanta, con un margen bruto del 6.7% al precio de venta de 0,38 USD. Simulaciones Monte Carlo confirman la solidez del modelo ante variaciones en el costo del diésel, la demanda y el número de paradas, promoviendo la economía circular.

***Palabras clave*—Logística inversa, optimización de rutas, neumáticos fuera de uso, QGIS, VRP, sostenibilidad.**

I. INTRODUCCIÓN

La acumulación de desechos sólidos, particularmente los Neumáticos Fuera de Uso (NFU), representa un desafío ambiental y sanitario a nivel global, con un impacto significativo en América Latina y el Caribe, donde se generan 231 millones de toneladas anuales de residuos sólidos, según el Banco Mundial [1]. En Bolivia, la gestión inadecuada de NFU agrava la contaminación en vertederos como K'ara K'ara y el Río Rocha en Cochabamba, generando problemas como contaminación del suelo y agua, proliferación de plagas y quemas incontroladas. A nivel mundial, se desechan anualmente 1,500 millones de neumáticos, de los cuales solo el 42% se recicla y el 15% se utiliza para recuperación energética [2], [3].

La logística inversa, que abarca la recolección, transporte y disposición adecuada de NFU, es clave para mitigar estos impactos, mejorar la eficiencia operativa y promover la sostenibilidad [4], [5]. En el contexto latinoamericano, ciudades como Bogotá han implementado modelos de logística inversa con algoritmos de optimización de rutas (Vehicle Routing Problem, VRP) y herramientas geoespaciales [6], logrando reducir costos y distancias. Sin embargo, en Bolivia, la falta de infraestructura, normativas específicas como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y el desinterés empresarial limitan el desarrollo de estas soluciones.

Este proyecto diseña un modelo de rutas para la logística inversa de NFU en Colcapirhua, Cochabamba, integrando Sistemas de Información Geográfica (SIG) en QGIS, técnicas de agrupación (K-means) y optimización de rutas mediante VRP [7], [3]. El modelo considera variables como ubicación de puntos de recolección, capacidad vehicular y restricciones de tráfico, buscando minimizar costos operativos y cumplir normativas ambientales [8]. La investigación se justifica por la necesidad de optimizar procesos logísticos, reducir el impacto ambiental y contribuir a la economía circular en la región [9], [10].

II. DESARROLLO DE CONTENIDOS

A. *Enfoque Metodológico*

El modelo adopta un enfoque transversal, cuantitativo y no experimental, integrando análisis geoespacial, agrupación y optimización de rutas. Se georreferenciaron 50 puntos generadores de NFU en QGIS, generando dos matrices de separación: una entre puntos generadores y otra desde estos al centro gravitacional. La segmentación en cinco conjuntos mediante el algoritmo K-means facilitó la asignación de rutas. La demanda diaria de 248 NFU se modeló con una distribución triangular, con resultados simulados mediante Monte Carlo, permitiendo manejar incertidumbre en la generación de residuos.

III. RESULTADOS

El modelo optimiza la recolección de NFU en Colcapirhua mediante la integración de herramientas geoespaciales en QGIS y algoritmos VRP, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia logística. Los resultados demuestran la capacidad del modelo para manejar la demanda diaria, mientras que el análisis económico valida su viabilidad financiera, apoyando la sostenibilidad ambiental.

A. *Diseño y calibración del Modelo*

Se emplearon camiones Sinotruk Howo con capacidad de 56 llantas por viaje, cuyas especificaciones se detallan en la tesis. Los datos georreferenciados se procesaron en QGIS para mapear puntos y calcular distancias. El algoritmo VRP, implementado en AMPL/CPLEX, optimizó cinco rutas considerando restricciones de capacidad y tiempo. El centro gravitacional, definido como punto de acopio, minimizó las distancias ponderadas. Simulaciones Monte Carlo analizaron la generación de NFU y la sensibilidad del modelo.

La generación diaria de NFU se estimó en 248 llantas, con resultados de simulación Monte Carlo mostrando estabilidad. La matriz de distancias entre puntos generadores y al centro gravitacional optimizó la ubicación del acopio. El análisis

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

estadístico confirmó la viabilidad del modelo para manejar la demanda proyectada con cinco vehículos, asegurando eficiencia operativa

B. Resultados de la Optimización

El modelo generó cinco rutas optimizadas para recolectar 248 NFU diarios utilizando camiones Sinotruk Howo con capacidad de 56 llantas por viaje. La distancia total recorrida es de 71.85 km, con tiempos de recolección entre 209 y 295 minutos por ciclo. La segmentación de 50 puntos generadores en cinco clústeres mediante K-means y el uso de QGIS optimizaron la asignación de rutas. La Tabla I resume los resultados obtenidos por vehículo, mientras la que Fig. 1 presenta las rutas generadas.

TABLE I. RESULTADOS DEL MODELO VRP CON CAPACIDAD

Vehículo	***Distancia (Km)***	***Tiempo (min)***	***NFU (Recolectados)***
0	19.06	127	36
1	18.55	287	56
2	12.49	295	56
3	11.44	271	46
4	10.28	209	54
Total	**71.85**	**1189**	**248**

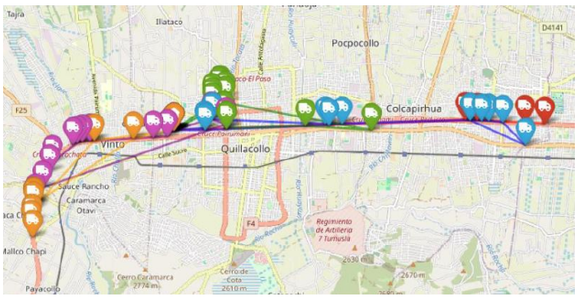


Fig. 1. Representación cartográfica de las rutas óptimas de recolección de NFU en Colcapirhua, generada en QGIS

C. Análisis Económico

El análisis financiero considera un horizonte basado en la vida útil de 15 años del camión elegido, proyectando un volumen de 178,560 llantas recolectadas en la vida útil, basado en una demanda por ciclo de 248 NFU durante 720 ciclos en toda la vida útil. El costo unitario por llanta recolectada es de 0,36 USD, calculado mediante el prorrateo, el costo operativo, la amortización del camión, el alquiler del lote, y las licencias y permisos (ver Tabla II). El precio de venta propuesto de 0,38 USD por llanta genera un margen bruto del 6.7%.

TABLE II. DESGLOSE DEL COSTO UNITARIO POR NFU

Concepto	***Costo (USD/NFU)***
Operativo	0,15
Amortización Camión	0.13
Alquiler del lote	0.072
Concepto	***Costo (USD/NFU)***
Total	**0,36**

Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del costo unitario frente a variaciones en variables clave, utilizando simulaciones Monte Carlo. Los resultados, representados en boxplots, muestran el impacto del precio del diésel, la demanda por ciclo y el número de paradas en el costo unitario por llanta.

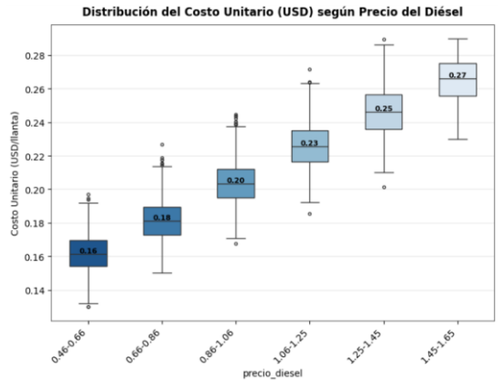


Fig. 2. Boxplot del costo unitario por llanta en función del precio del diésel

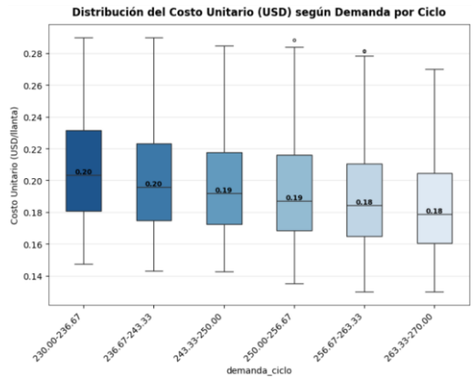


Fig. 3. Boxplot del costo unitario por llanta en función de la demanda por ciclo.

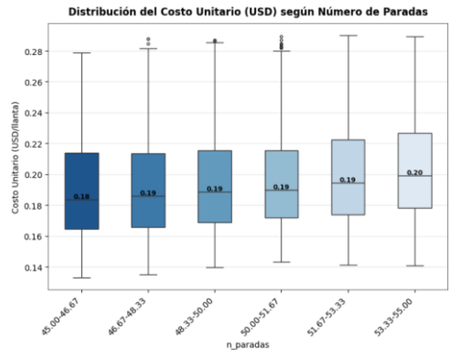


Fig. 4. Boxplot del costo unitario por llanta en función del número de paradas

El análisis de sensibilidad mediante simulaciones Monte Carlo confirma la viabilidad técnica y económica del modelo, mostrando estabilidad ante variaciones en el precio del diésel, la demanda y el número de paradas. La integración de QGIS, K-means y VRP asegura una solución escalable y adaptable, promoviendo la gestión sostenible de NFU.

La solución optimiza la recolección de NFU, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia logística. Este modelo es replicable en otras regiones, apoyando la economía circular y la Responsabilidad Extendida del Productor en Bolivia

IV. CONCLUSIONES

El modelo diseñado para la logística inversa de neumáticos fuera de uso (NFU) en Colcapirhua demostró ser técnica, económica y ambientalmente viable. A través de la georreferenciación de 50 puntos de generación, la segmentación mediante K-means y la optimización de rutas con VRP en QGIS, se establecieron cinco rutas eficientes capaces de recolectar 248 NFU diarios con distancias y tiempos reducidos frente a esquemas tradicionales. El análisis económico determinó un costo unitario de 0,36 USD por llanta y un margen bruto del 6.7 %, confirmando la factibilidad financiera y resaltando la importancia del precio del diésel como variable crítica. Asimismo, el modelo contribuye a mitigar la contaminación de suelos, agua y aire, disminuye riesgos sanitarios y apoya el cumplimiento de la Ley 755 sobre gestión integral de residuos, integrándose a la Responsabilidad Extendida del Productor. Su enfoque metodológico, que combina optimización matemática, análisis geoespacial y simulaciones Monte Carlo, lo convierte en una herramienta replicable y escalable para otros municipios, promoviendo la economía circular y fortaleciendo la sostenibilidad ambiental y social en Bolivia.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Privada Boliviana (UPB) por el apoyo institucional brindado durante el desarrollo de la investigación, así como al Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas y al Centro de Operaciones Logísticas por la colaboración técnica y metodológica que permitió consolidar este trabajo.

REFERENCES

[1] Open Knowledge Repository. (2018, September 20). Open Knowledge Repository. Retrieved February 16, 2025, from https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a

[2] Tire Waste Statistics You Need To Know. (2024, 06 26). Contec. Retrieved February 16, 2025, from https://contec.tech/tire-waste-statistics-need-to-know/

[3] Wysocky, K. (2014, August 7). Cuatro formas de reciclar los neumáticos usados. BBC. Retrieved February 16, 2025, from https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/08/140806_vert_aut_usar_cauchos_reciclados_yv

[4] Feal Vázquez, J. (2008). Logística inversa. Dialnet. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3346655

[5] Mas McGowen, R., García Quiroz, J. R., & Reyes Luna Victoria, A. M. (2016, 12 20). Propuesta de un sistema de logística inversa de llantas inservibles para reducir el impacto ambiental y gasto por consumo de combustible en el servicio de gestión ambiental de Trujillo. Repositorio institucional UPN. https://hdl.handle.net/11537/11106

[6] Barrera Valbuena, L., & Ibarra Vega, D. (18, 12 19). METODOLOGÍA BASADA EN SIG Y MODELAMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE LLANTAS USADAS EN BOGOTÁ. https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/3065/2839

[7] C. Pop, P., Kara, I., & Horvat Marc, A. (2012, 1). New mathematical models of the generalized vehicle routing problem and extensions. sciencedirect. https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.05.037

[8] REGLAMENTEO DE LEY, MEDIO AMBIENTE. (1992). REGLAMENTO DE GESTIO DE RESIDUOS SOLIDOS.

[9] Las llantas como algo más que contaminación. (2024, January 10). Valor Compartido. Retrieved February 16, 2025, from https://valor-compartido.com/las-llantas-como-algo-mas-que-contaminacion/

[10] [24] Paco Vargas, M. A. (2022). Logística inversa en empresas de comercialización de productos masivos. Caso Industrias Venado S.A. revista impulso. https://revistaimpulso.org/index.php/impulso/article/view/112

Session N°10 – Track N°1

Last Mile Logistics

Chair: Derakhti, A. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
Place: G6-054
Time: 10:00 – 11:15

A Bilevel Optimization Approach for Crowdsourced Last-Mile Delivery with Route Preference

Time: 10:00 – 10:15
Authors:

- Ilabaca, A. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Montecinos, J. *(École de Technologie Supérieure)*
- Paredes-Belmar, G. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*

Asignación Estratégica de Patrullas contra Microbasurales mediante Optimización Binivel y Juegos de Stackelberg

Time: 10:20 – 10:35
Authors:

- Astudillo, M. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*
- Escalona, P. *(Universidad Técnica Federico Santa María)*

Estimación del Costo Marginal No Interiorizado de la Congestión Generada por Vehículos de Carga en Entornos Urbanos

Time: 10:40 – 10:55
Authors:

- Tapia-Jaque, N. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Basso, F. *(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)*
- Pezoa, R. *(Universidad Diego Portales)*
- Varas, M. *(Universidad del Desarrollo)*

Decarbonizing Urban Logistics in Chile: Modeling Carbon Pricing Effects on EV Adoption

Time: 11:00 – 11:15
Authors:

- Derakhti, A. *(Universidad Adolfo Ibáñez)*
- González-Ramírez, R. *(Universidad de los Andes)*
- Camacho-Vallejo, J. *(Tecnológico de Monterrey)*

A Bilevel Optimization Approach for Crowdsourced Last-Mile Delivery with Route Preference

*

Antonia Ilabaca[1,2]
[1]*School of Industrial Engineering, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile*
[2]*Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad del Bío-Bío, Chile*
antonia.ilabaca.c@mail.pucv.cl

Julio Montecinos[3]
[3]*Department of Systems Engineering École de Technologie Supérieure (ÉTS)*
Montreal, QC, Canada
julio.montecinos@etsmtl.ca

Germán Paredes-Belmar[1]
[1]*School of Industrial Engineering Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*
Valparaíso, Chile
german.paredes@pucv.cl

This study addresses the last-mile delivery problem within a crowdsourced logistic framework using a bilevel optimization approach. In this structure, the upper level represents the logistics company, which assigns independent drivers to urban service zones and plans the main truck's route between transfer points. The lower-level models the behavior of the crowdsourced drivers, who choose their own delivery routes within their assigned areas according to personal preferences and service quality (QoS) objectives. Given the combinatorial complexity of the problem, we propose a two-phase heuristic framework. In the first phase, feasible and high-quality routes are generated for each driver–zone pair using constructive heuristics, creating a pool of potential routes that represent likely driver decisions. In the second phase, a metaheuristic is applied to select driver assignments and routes from this pool while simultaneously building the main truck's route. The model follows a hierarchical leader–follower logic consistent with Stackelberg game theory, preserving the interdependent decision structure without requiring nested optimization at each iteration. This approach offers a scalable and computationally efficient method suitable for large, real-world instances. In general, the proposed framework improves efficiency, flexibility, and sustainability in last-mile logistics operations by effectively integrating centralized planning and decentralized driver behavior within a unified optimization model.

Asignación Estratégica de Patrullas contra Microbasurales mediante Optimización Binivel y Juegos de Stackelberg

Maximiliano Astudillo
Departamento de Industrias
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
maximiliano.astudill@usm.cl

Pablo Escalona
Departamento de Industrias
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
pablo.escalona@usm.cl

***Abstract*—El vertido ilegal en microbasurales es uno de los principales retos a los que se enfrentan las ciudades del Sur Global, donde la limitada capacidad de aplicación de la ley y la marginación socioespacial amplifican los riesgos medioambientales y para la salud. Dentro de este problema, los residuos de construcción y demolición (RCD) constituyen una parte importante del total de residuos y, cuando se eliminan de forma inadecuada, degradan los suelos y las masas de agua, propagan enfermedades y aumentan el riesgo de incendios. En este trabajo, abordamos el problema del vertido ilegal en microbasurales utilizando un enfoque de juego de Stackelberg, en el que la autoridad (líder) define la frecuencia de las inspecciones en una red espacial de sitios ilegales, y los contratistas (seguidores) eligen el sitio de eliminación que minimiza su costo esperado, teniendo en cuenta los costos de transporte, la entrada y la multa a la que se enfrentan, interpretando la probabilidad de inspección como la frecuencia de inspección a largo plazo. Derivamos una formulación equivalente de asignación impredecible y construimos programas con generación de columnas.**

***Index Terms*—Illegal dumping, Stackelberg security games, Unpredictable allocation schedule, Enforcement strategy**

I. Introducción

La proliferación de microbasurales y la disposición ilegal de residuos (en particular, RCD) constituyen un problema socio-ambiental persistente que afecta de manera desproporcionada a barrios vulnerables y tensiona las capacidades de fiscalización municipal [1], [2]. En el caso de Valparaíso, la evidencia reciente da cuenta de múltiples focos activos y un contexto operativo donde la inspección sostenida en todos los puntos no es factible de manera permanente, lo que favorece dinámicas de desplazamiento del vertido hacia zonas no vigiladas [3].

Frente a este desafío, proponemos una *estrategia de intervención spot* que introduce *impredecibilidad* en el despliegue de equipos de fiscalización. El enfoque modela la interacción *autoridad–contratistas* como un juego de Stackelberg de suma cero: la autoridad decide una política de asignación de equipos que se interpreta como una *frecuencia de inspección de largo plazo* P_j para cada sitio ilegal, y los contratistas responden eligiendo el destino que minimiza su costo esperado, internalizando costos de transporte, tarifas y la multa enfrentada cuando hay control. Este enfoque permite alinear la práctica de fiscalización con un principio operativo claro: aumentar el costo esperado del vertido ilegal en los focos relevantes, induciendo su desvío hacia el sitio autorizado.

Para hacer operativa la impredecibilidad en territorio, representamos la política como una *asignación impredecible*, y la construimos con un procedimiento escalable de generación de columnas que identifica, de entre todas las combinaciones posibles, sólo aquellas que son útiles para la política. Sobre esa base, simulamos la decisión de la autoridad respecto de que esquema utilizar día a día en horizonte finito bajo dos enfoques: una línea base Monte Carlo y un GRASP con sesgo por cobertura. Evaluamos el desempeño con los indicadores *Eliminación Efectiva (EE)* y *Reducción de Residuos (WR)*, y discutimos las implicancias para la planificación municipal.

II. Formulación del modelo

A. Formulación de una estrategia de intervención spot para microbasurales

Considere una ciudad con un conjunto de I ($i = 1, ..., |I|$) de cuadras con contratistas que generan RCD. Sea J el conjunto de sitios ilegales de deposición de residuos ($j = 1, ..., |J|$), mientras que el conjunto de lugares de depósitos legales señalados por la autoridad se denota por J_0, donde $J \cap J_0 = \emptyset$. La autoridad posee n equipos de vigilancia que puede desplegar en cualquiera de los j sitios ilegales, donde $n < |J|$.

1) Problema del seguidor: Los contratistas que disponen ilegalmente de residuos se modelan como agentes racionales. Sea C_{ij} el costo de transporte de la cuadra i al sitio j, F la multa aplicable y B_{ij} el costo de transporte y acceso al vertedero autorizado $j \in J_0$, donde $F \gg B_{ij} \gg C_{ij}$.

Sea la variable de decisión W_{ij} igual a 1 si los contratistas de la cuadra i deciden ir al sitio j, 0 en otro caso. El costo esperado de los contratistas de i viene dado por:

$$U_i(\mathbb{P}_j) = \mathbb{E}(\mu_i) = \sum_{j \in J} (C_{ij} + F\mathbb{P}_j)\, W_{ij} + \sum_{j \in J_0} B_{ij} W_{ij}, \quad (1)$$

donde $\mathbb{P}_j$ es la probabilidad de que la autoridad asigne un equipo en el sitio j. Por lo tanto, el problema de optimización de los contratistas de la cuadra i viene dado por:

$$\mathrm{FP_i(P)}: \min_{\mathbf{W}_i} \sum_{j\in J} (C_{ij} + F\mathbb{P}_j) W_{ij} + \sum_{j\in J_0} B_{ij} W_{ij} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j\in J\cup J_0} W_{ij} = 1 \quad (3)$$

$$W_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in J \cup J_0. \quad (4)$$

2) Problema del líder: La autoridad dispone de n equipos para desplegar, por lo que $\sum_{j\in J} \mathbb{P}_j \leq n$. Su función objetivo es maximizar el costo esperado de los contratistas para incentivarlos a ir al depósito autorizado:

$$\mathrm{LP}: \max_{P,\mathbf{U}} \sum_{i\in I} d_i U_i \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j\in J} \mathbb{P}_j \leq n \quad (6)$$

$$U_i \leq B_{ij} \qquad \forall j \in J_0, \forall i \in I \quad (7)$$

$$U_i \leq C_{ij} + F\mathbb{P}_j \qquad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (8)$$

$$\mathbb{P}_j \in [0,1] \qquad \forall j \in J \quad (9)$$

$$U_i \geq 0 \qquad \forall i \in I. \quad (10)$$

Las restricciones (7) y (8) representan la reacción óptima de los contratistas.

Para monitorear el avance de la política de control, proponemos dos indicadores de desempeño agregados, Eliminación Efectiva (EE) y Reducción de Residuos (WR), que miden la fracción de contratistas y residuos desviados a sitios autorizados, se definen respectivamente como:

$$\mathrm{EE} = 1 - \frac{\sum_{j\in J}\sum_{i\in I} W_{ij} d_i}{\sum_{i\in I} d_i}, \quad (11)$$

$$\mathrm{WR} = 1 - \frac{\sum_{j\in J}\sum_{i\in I} W_{ij} q_i}{\sum_{i\in I} q_i}. \quad (12)$$

B. Formulación equivalente para asignación impredecible

Para abordar la impredictibilidad, se formula un problema equivalente (LP-US) considerando todos los esquemas de asignación posibles $s \in S$ donde la autoridad ubica sus n equipos. Sea π_s la probabilidad de seleccionar el esquema s, con $\sum_{s\in S} \pi_s = 1$. La probabilidad de vigilancia en j es $\mathbb{P}_j = \sum_{s\in S} \pi_s Y_{j|s}$, donde $Y_{j|s} = 1$ si el esquema s asigna un equipos en el sitio j. La formulación LP-US es:

$$\mathrm{LP-US}: \max_{\boldsymbol{\pi},\mathbf{U}} \sum_{i\in I} d_i U_i \quad (13)$$

$$\text{s.t. } U_i \leq B_{ij} \forall j \in J_0, \forall i \in I \quad (14)$$

$$U_i \leq C_{ij} + F \sum_{s\in S} \pi_s Y_{j|s} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (15)$$

$$\sum_{s\in S} \pi_s = 1 \quad (16)$$

$$\pi_s \geq 0 \quad (17)$$

$$U_i \geq 0. \quad (18)$$

Dado el tamaño exponencial de S, se emplea Generación de Columnas. El Subproblema de Pricing (SP), que genera nuevos esquemas con costo reducido positivo, es:

$$\mathrm{SP}: \max_{\mathbf{Y}} F \sum_{j\in J}\sum_{i\in I} \lambda^*_{ij} Y_{j|s} - \theta^* \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j\in J} Y_{j|s} \leq n, \quad (20)$$

$$Y_{j|s} \in \{0,1\}. \quad (21)$$

El procedimiento iterativo resulta en un conjunto factible de esquemas $\hat{S}_r$ con $\pi_s > 0$.

C. Sobre la implementación práctica de la estrategia de inspección spot

Para operacionalizar la estrategia, se simula la selección diaria de un esquema $s \in \hat{S}_r$ durante un horizonte de T días. Se comparan dos enfoques: **(i) Monte Carlo**, que selecciona esquemas aleatoriamente según la proporción de veces que será implementado cada esquema, y **(ii) GRASP** (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), que incorpora información de cobertura histórica para priorizar sitios escasamente vigilados, mejorando potencialmente el desempeño de los indicadores EE y WR.

III. Resultados experimentales

Los experimentos se realizaron para la ciudad de Valparaíso, considerando $|I| = 4541$ cuadras, $|J| = 27$ sitios ilegales y $|J_0| = 1$ sitio autorizado. El modelo se resolvió para una configuración con $n = 5$ equipos y una multa $F = 205.000$ CLP. Se define un umbral para el indicador EE del 55%, una proporción que se alinea con estimaciones de disposición ilegal reportadas en estudios de otros países [4].

La resolución del problema LP-US mediante Generación de Columnas identificó un conjunto $\hat{S}_r$ de 22 esquemas de patrullaje útiles ($\pi_s > 0$). La distribución espacial de las probabilidades de inspección $\mathbb{P}_j$ resultantes (Fig. 1) muestra que la autoridad asigna mayor probabilidad de vigilancia a los sitios ilegales j que se encuentran cercanos a las cuadras con mayor densidad de generación de infractores (d_i) y residuos (q_i), lo que es coherente con el objetivo de maximizar el costo esperado de los contratistas.

Para materializar esta estrategia en un plan operativo de $T = 250$ días con $k = 2$ inspecciones diarias, se compararon los enfoques de programación Monte Carlo y GRASP. La Figura 2 muestra la evolución del indicador EE bajo el enfoque Monte Carlo. El desempeño se mantiene cercano a cero durante la mayor parte del horizonte, alcanzando un EE final muy por debajo del umbral de 55%. Este resultado confirma que una selección puramente aleatoria y a la cantidad de días en que se seleccionará cada esquema s pospone la cobertura de sitios críticos con menor frecuencia histórica, retrasando significativamente la convergencia hacia la mezcla óptima de esquemas y, por ende, la efectividad disuasiva.

Por el contrario, el enfoque GRASP (Fig. 3), que incorpora un sesgo de selección informado por la cobertura histórica de

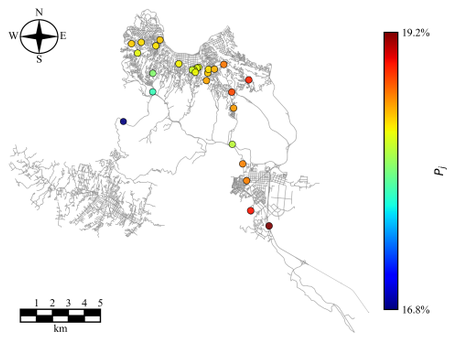


Fig. 1. Distribución espacial de las probabilidades de inspección $\mathbb{P}_j$ para $n = 5$ y $F = 205.000$.

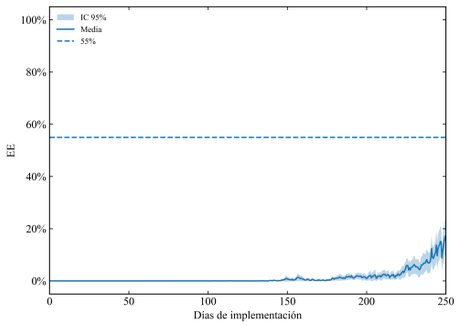


Fig. 2. Evolución temporal del indicador de Eliminación Efectiva (EE) bajo el enfoque de Monte Carlo (IC 95%).

cada sitio, acelera la convergencia. El indicador EE comienza a aumentar de manera sostenida a partir del día 100, alcanzando cerca de un 40% al final del período. Si bien supera ampliamente el desempeño de Monte Carlo, aún no alcanza el 55% objetivo, lo que sugiere que para el conjunto de esquemas y el horizonte considerados, la política requiere de una fase de implementación más larga o de un ajuste en los parámetros del algoritmo para lograr una convergencia más rápida. La variabilidad observada es inherente al carácter aleatorio de la Lista Restringida de Candidatos (RCL) y al tamaño del conjunto de esquemas.

IV. Conclusiones

El hallazgo central de política es la **regla "no-cero"**: para evitar el desplazamiento de la ilegalidad, la probabilidad de inspección (y en la práctica, la frecuencia de inspección) debe ser estrictamente positiva ($\mathbb{P}_j > 0$) en todos los sitios $j \in J$. La formulación equivalente LP-US y el procedimiento de Generación de Columnas permiten operacionalizar este principio, identificando un conjunto manejable de esquemas de patrullaje que, implementados de forma impredecible, inducen incertidumbre en los infractores.

Los resultados experimentales en Valparaíso demuestran que la efectividad de la política (medida por el indicador EE) es altamente sensible a la interacción entre el número de equipos

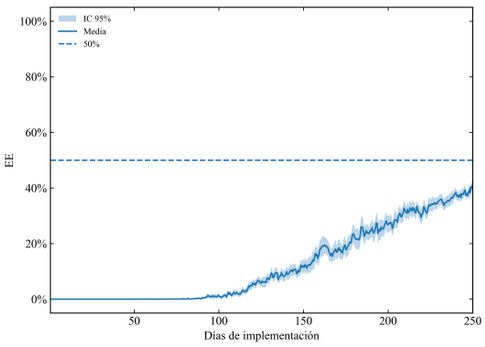


Fig. 3. Evolución temporal del indicador de Eliminación Efectiva (EE) bajo el enfoque GRASP con α dinámico (IC 95%).

(n) y el valor de la multa (F), existiendo un *trade-off* claro entre ambos parámetros. Críticamente, la implementación práctica de los esquemas mediante un cronograma es crucial. Mientras que un enfoque Monte Carlo no logra alcanzar el desempeño esperado en horizontes finitos, la estrategia GRASP (que prioriza activamente la cobertura de sitios poco vigilados) muestra una convergencia significativamente más rápida y robusta, acercándose a la meta de desempeño establecida.

Referencias

[1] B. C. Hohl et al., "Community identified characteristics related to illegal dumping; a mixed methods study to inform prevention," *Journal of Environmental Management*, vol. 346, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118930.

[2] A. S. Molla, W. Tang, W. Sher, M. M. Bahar, and D. N. Bekele, "The effects of construction and demolition waste (c&dw) fine residues on landfill environments: A column leaching experiment," *Toxics*, vol. 13, no. 5, 2025, ISSN: 2305-6304. DOI: 10.3390/toxics13050370. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2305-6304/13/5/370.

[3] F. Ossio and J. Faúndez, *Diagnóstico Nacional de Sitios de Disposición Ilegal de Residuos*, Santiago, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/348443724_Diagnostico_Nacional_de_Sitios_de_Disposicion_Ilegal_de_Residuos.

[4] L. H. Nguyen et al., "Material and monetary flows of construction and demolition waste and assessment on physical and environmental properties of illegally dumped construction and demolition waste in hanoi," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 60, pp. 125 965–125 976, Nov. 2023, ISSN: 1614-7499. DOI: 10.1007/s11356-023-30978-8. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-30978-8.

Estimación del costo marginal no interiorizado de la congestión generada por vehículos de carga en entornos urbanos

Nicolás Tapia-Jaque
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
nicolas.tapia.j@mail.pucv.cl

Franco Basso
School of Industrial Engineering
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile
franco.basso@pucv.cl

Raul Pezoa
School of Industrial Engineering
Universidad Diego Portales
Santiago, Chile
raul.pezoa@udp.cl

Mauricio Varas
School of Engineering
Universidad del Desarrollo
Santiago, Chile
mavaras@udd.cl

***Abstract*—La congestión urbana producida por el transporte representa un desafío estructural para la eficiencia logística y la sostenibilidad de las ciudades. Además de las implicancias operativas del transporte en la cadena de suministro, los vehículos de carga generan externalidades no interiorizadas que afectan directamente a las personas, generando un impacto en el bienestar social. Este estudio tiene como objetivo estimar el costo marginal no interiorizado de la congestión ocasionado por los vehículos de carga en la ciudad. Para esto, se integran datos de GPS del movimiento de vehículos de carga con información de las velocidades promedio en el tiempo y de flujo de libre en la red vial de la ciudad. La metodología se basa en la formulación del Bureau of Public Roads (BPR) para cuantificar el impacto en el tiempo de viaje adicional asociado a la incorporación de un vehículo de carga a la red. El enfoque metodológico propuesto busca representar de manera detallada el tráfico urbano al considerar el flujo de vehículos de carga de manera no homogénea. Este trabajo complementa las investigaciones centradas en la eficiencia del transporte de carga al considerar la dimensión social evidenciando el costo que los vehículos de carga imponen sobre el resto de los usuarios de la red. En conjunto, los resultados esperados contribuyen a la discusión sobre políticas públicas y estrategias de planificación logística orientadas a la gestión considerando la responsabilidad social de las empresas transportistas de manera de generar un uso más equitativo del espacio vial urbano.**

***Index Terms*—Congestión urbana; transporte de carga; costo marginal; externalidades; datos GPS; sostenibilidad urbana; equidad vial**

Franco Basso gratefully acknowledges the financial support from the Complex Engineering Systems Institute, ISCI (ANID-PIA/PUENTE AFB230002), ANID-FONDECYT 1241335, ANID-FONDEF ID25I10409 and ANID-FOVI 240048. Raúl Pezoa acknowledges the financial support from ANID-FONDECYT 1241913. Mauricio Varas acknowledges the financial support from ANID-FONDECYT 1241843. Nicolás Tapia thanks doctoral scholarship to ANID-PFCHA/Doctorado Nacional/2025-21251616.

Decarbonizing Urban Logistics in Chile: Modeling Carbon Pricing Effects on EV Adoption

Arman Derakhti
Faculty of Engineering and Sciences
Universidad Adolfo Ibáñez
Santiago, Chile
derakhti.arman@gmail.com

Rosa G. González-Ramírez
Faculty of Science and Engineering
Universidad de Los Andes
Santiago, Chile
rgonzalez@uandes.cl

Jose-Fernando Camacho-Vallejo
Engineering and Sciences School
Tecnologico de Monterrey
Monterrey, Mexico
fernando.camacho@tec.mx

***Abstract*—** The transition to electric vehicles (EVs) in last-mile delivery is widely recognized as a critical strategy for reducing greenhouse gas emissions, improving urban air quality, and promoting sustainable freight transport. However, the pace of EV adoption remains slow, particularly in developing economies such as Chile, where economic and regulatory uncertainties persist. This study addresses this challenge by developing a single-objective mathematical optimization model to evaluate how carbon pricing policies such as carbon taxes and cap-and-trade mechanisms influence the operational and environmental performance of EV fleets. The model, formulated as a mixed-integer linear program (MILP), seeks to minimize the total system cost of last-mile delivery while incorporating emissions-based pricing schemes and realistic parameters from both conventional and electric vehicle technologies. Drawing on data from national pilot programs such as Electrologística, the model simulates fleet composition decisions, cost-efficiency, and emissions outcomes under varying carbon price levels. The model is subjected to sensitivity analyses to assess policy effectiveness in promoting EV adoption. This work contributes to the practical applications and literature on sustainable urban logistics by offering a robust decision-support tool for policymakers and logistics operators seeking to accelerate fleet electrification in the face of climate and regulatory pressures.

Keywords—Carbon Pricing Policies, Last-Mile Delivery, Sustainable Logistics, Fleet Electrification

I. Introduction and Literature Review

Sustainability has evolved from a distant aspiration to an urgent necessity, particularly in the context of climate change—the most critical global challenge of our time. Greenhouse gas emissions, especially CO_2, are a primary driver, and limiting global warming to 1.5°C requires rapid, deep emission cuts [1]. The transportation sector is a major contributor, responsible for 24% of global emissions and 26% in Chile [2].

Within this sector, last-mile delivery is among the most emission-intensive activities, often representing over half of logistics costs and generating disproportionate urban pollution [3]. The surge in e-commerce, particularly in Latin America, has amplified delivery demand and exacerbated congestion, noise, and air quality issues.

Research in sustainable urban logistics has explored strategies such as routing optimization, collaborative systems, and low-carbon technologies. EVs including BEVs, PHEVs, and HEVs emerge as promising solutions, offering emission reductions, potential cost savings, and public health benefits [4], [5]. However, their adoption in freight transport is hindered by high upfront costs, limited infrastructure, and regulatory gaps [6].

While operational innovations can improve efficiency, policy instruments are often decisive in triggering large-scale transitions. Economic measures, particularly carbon pricing, seek to internalize environmental costs and reshape the economics of fleet operations. By influencing investment decisions, mechanisms such as carbon taxes, cap-and-trade systems, and carbon offsets can encourage the integration of EVs into urban logistics networks. Yet, their effectiveness depends on local conditions, stakeholder behavior, and market maturity.

This study examines the potential of carbon pricing to accelerate sustainable last-mile delivery transitions in urban Chilean context.

II. Literature Review

Environmental, economic, and social imperatives—ranging from reducing greenhouse gas emissions and improving air quality to creating new employment opportunities—are driving the global shift toward Evs [7], [8]. EVs offer lower operating costs, quieter operation, and greater energy efficiency compared to internal combustion engine vehicles [5], [9]. These attributes make them an attractive option for mitigating urban air pollution, addressing climate change, and reducing dependence on fossil fuels [10], [11].

In Chile, several pilot programs have tested the viability of EVs in last-mile urban logistics under the “Electrologística” initiative, coordinated by the Ministry of Transport and Telecommunications with Conecta Logística and CORFO. The 2021 Santiago pilot, involving seven logistics operators and seven EVs, achieved a 70% reduction in operating costs and avoided 3.8 tons of CO_2eq over eight weeks, while highlighting limitations in charging infrastructure. The 2022 Concepción pilot replicated these benefits 69% cost savings and 2.4 tons CO_2eq avoided—demonstrating regional scalability but underscoring the need for infrastructure planning. A 2024 phase at the shared urban hub “La Fábrica” in Renca showed improvements in route management and collaboration, though full emissions data is pending. Across the first two pilots alone, 6.2 tons of CO_2eq were avoided, reinforcing both the environmental and economic potential of EVs, as well as the operational gaps to be addressed.

Urban freight’s rapid growth intensifies congestion, emissions, and inefficiencies, prompting municipalities to seek cleaner transport solutions [12], [13]. Yet, despite the promise of EVs, adoption remains constrained by high capital costs, range limitations, and underdeveloped charging networks barriers especially pronounced in emerging economies. This has led to growing interest in economic policy instruments, such as carbon pricing, as potential accelerators of low-carbon transitions.

While research on EV deployment has expanded, most studies address technical or operational aspects—battery range, routing, or charging strategies—without integrating the broader policy framework. Conversely, the carbon pricing literature largely targets energy, agriculture, biomass, or manufacturing, with limited application to urban freight and even less to last-mile delivery. Existing supply chain optimization studies show the potential of carbon taxes and cap-and-trade systems to influence fleet composition and routing [14], [15], [16], [17], [18], [19], but few incorporate EVs or charging infrastructure.

Some recent efforts have examined carbon pricing in mobility contexts. Paper presented by [20] showed that upstream emissions penalties under cap-and-trade can promote EV uptake when vehicles are already cost-competitive. The research by [21], using Madrid data, concluded that carbon pricing alone is insufficient for last-mile EV adoption under low-mileage conditions, stressing the need for complementary subsidies. Finally, a model was developed by combining electricity–carbon pricing model to optimize charging, though with a focus on energy systems rather than logistics operations [22].

Overall, the literature remains fragmented, with few studies explicitly linking carbon pricing to the operational and economic viability of EVs in last-mile freight. While some research explores multi-objective trade-offs—balancing cost, emissions, and other criteria—there is a notable gap in focused single-objective analyses that isolate the direct impact of carbon pricing mechanisms on fleet adoption decisions. Such analyses are essential for establishing baseline results before integrating more complex objectives and constraints.

This study addresses that gap by developing a single-objective optimization model to evaluate the effects of different carbon pricing mechanisms on EV adoption in Santiago's last-mile delivery sector. Drawing on empirical evidence from Chilean pilot programs, the model assesses cost implications and operational performance under alternative regulatory scenarios. Multi-objective extensions, incorporating additional environmental and infrastructure considerations, will be explored in subsequent stages of the broader research project.

III. METHODOLOGY

This study develops a single-objective MILP model to evaluate the influence of carbon pricing policies on the adoption and operation of EV fleets in last-mile urban delivery. The model aims to minimize the total system cost, which includes vehicle acquisition and maintenance expenses, energy consumption costs, and carbon taxes applied to greenhouse gas emissions from conventional internal combustion engine vehicles (ICEVs).

The proposed research extends the methodological framework shown in blow table to develop a mathematical model for EV adoption in last-mile delivery, with particular emphasis on vehicle routing problems.

Key operational constraints such as vehicle capacity, driving range limitations, delivery time windows, and routing requirements are explicitly incorporated to reflect realistic urban logistics conditions. The carbon pricing mechanism is embedded in the cost function, enabling the assessment of how varying carbon tax levels impact fleet composition, routing decisions, and overall delivery costs.

Table 1.Proposed mathematic model

Model I: Optimization model including carbon tax policy	
Objective function F(x)	Minimize the total cost under carbon tax policy, F(x) F(x) = f(x) + pc * e(x)
Model II: Optimization model including cap-and-trade policy	
Objective function F(x)	Minimize the total cost under carbon cap-and-trade policy, F(x) $F(x) = f(x) + pc * (e_{CT}^{plus} - e_{CT}^{minus}) + p_{ini} * Initiall$
Subject to	$e(x) - e_{CT}^{plus} + e_{CT}^{minus} = Initiall$
Model III: Optimization model including carbon offset policy	
Objective function F(x)	Minimize the total cost under carbon offset policy, F(x) $F(x) = f(x) + pc * (e_{CO}^{plus})$
Subject to	$e(x) - e_{CO}^{plus} + e_{CO}^{minus}$=ComplianceTarget

As shown in Table 1 F(x) represents the total objective function, f(x) total cost, pc carbon tax price, and e(x) emissions objective function. e_{CT}^{plus} , denotes positive deviation of total emissions *e(x)* from the initial allowance while e_{CT}^{minus} denotes negative deviation of total emissions *e(x)* from the initial allowance. Similarly, e_{CO}^{plus} shows positive deviation of total emissions from the compliance target, and e_{CO}^{minus} the negative deviation of total emissions from the compliance target. The term initial refers to the initial allowance.

The first model minimizes the total cost under a carbon tax policy, with no additional constraints beyond the system's operational and capacity limits. The second model, which considers a cap-and-trade policy, includes an additional constraint to ensure that total emissions $e(x)$, adjusted for positive (e_{CT}^{plus}) and negative (e_{CT}^{minus}) deviations, match the initial allowance. The positive and negative deviation variables allow the model to capture over- or under-emission relative to the cap.

Similarly, the third model, which incorporates a carbon offset policy, includes a constraint that guarantees total emissions, adjusted by deviations, meet the compliance target. Here, e_{CO}^{plus} and e_{CO}^{minus} track positive and negative deviations from the target, allowing the model to account for offset policies effectively.

Model parameters and input data are grounded in empirical evidence from pilot programs and operational data collected in Chilean urban freight settings, including energy consumption rates, emission factors, and local electricity and fuel prices. The model is implemented using a general-purpose optimization solver and applied to a case study based on a district in Santiago, Chile.

To analyze the robustness of the results, sensitivity analyses are performed across a range of carbon price scenarios, identifying the threshold carbon tax values at which EV deployment becomes economically preferable to conventional fleets. In addition, the analyses explore the effects of varying key parameters, such as fuel costs, fleet size, and electricity prices, to assess the stability of the results under different plausible conditions. Although this research is part of a broader project that will later incorporate multi-objective frameworks to balance cost, emissions, and infrastructure

planning, this paper focuses exclusively on the single-objective cost minimization model to establish a clear baseline for policy impact assessment.Expected results

This study is expected to deliver a rigorously validated single-objective optimization model that quantitatively links carbon pricing levels to the economic viability and operational performance of electric vehicle fleets in last-mile delivery. By integrating real-world data from Chilean urban freight pilots and incorporating practical delivery constraints, the model will provide a robust decision-support tool for evaluating how carbon taxes influence fleet composition, routing efficiency, and overall logistics costs.

Furthermore, through sensitivity analysis across a range of carbon price scenarios, the research will identify critical policy thresholds that trigger shifts from conventional fossil-fueled vehicles to electric fleets. These threshold values will offer actionable insights for policymakers to calibrate carbon pricing mechanisms effectively, ensuring that such economic instruments can accelerate the adoption of low-emission technologies in urban logistics. This foundational understanding will also pave the way for future multi-objective studies addressing broader sustainability goals.

REFERENCES

[1] IPCC, "Global Warming of 1.5°C, an IPCC special report on the impacts of global warming," 2018. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/

[2] N. T. Ha, M. Akbari, and B. Au, "Last mile delivery in logistics and supply chain management: a bibliometric analysis and future directions," 2023. doi: 10.1108/BIJ-07-2021-0409.

[3] G. de C. Ministerio de Energía, "Transición Energética de Chile Política Energética Nacional," 2022.

[4] W. Barbosa *et al.*, "Electric Vehicles: Bibliometric Analysis of the Current State of the Art and Perspectives," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 2, 2022, doi: 10.3390/en15020395.

[5] D. A. B. Ramirez, G. E. V. Ochoa, A. R. Peña, and Y. C. Escorcia, "Bibliometric analysis of nearly a decade of research in electric vehicles: A dynamic approach," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, no. 17, 2018.

[6] E. Morganti and M. Browne, "Technical and operational obstacles to the adoption of electric vans in France and the UK: An operator perspective," *Transp Policy (Oxf)*, vol. 63, 2018, doi: 10.1016/j.tranpol.2017.12.010.

[7] V. Singh, H. Singh, B. Dhiman, N. Kumar, and T. Singh, "Analyzing bibliometric and thematic patterns in the transition to sustainable transportation: Uncovering the influences on electric vehicle adoption," *Research in Transportation Business and Management*, vol. 50, 2023, doi: 10.1016/j.rtbm.2023.101033.

[8] G. Singh, S. C. Misra, Y. Daultani, and S. Singh, "Electric vehicle adoption and sustainability: Insights from the bibliometric analysis, cluster analysis, and morphology analysis," *Operations Management Research*, vol. 17, no. 2, 2024, doi: 10.1007/s12063-024-00442-y.

[9] M. Todorovic, A. Aldakkhelallah, and M. Simic, "Managing Transitions to Autonomous and Electric Vehicles: Scientometric and Bibliometric Review," 2023. doi: 10.3390/wevj14110314.

[10] S. M. Patella, G. Grazieschi, V. Gatta, E. Marcucci, and S. Carrese, "The adoption of green vehicles in last mile logistics: A systematic review," 2021. doi: 10.3390/su13010006.

[11] E. Purwanto and A. P. Irawan, "Bibliometric Analysis of Electric Vehicle Adoption Research: Trends, Implications, and Future Directions," *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.18280/ijsse.130503.

[12] P. Cossu, "Clean Last Mile Transport and Logistics Management for Smart and Efficient Local Governments in Europe," in *Transportation Research Procedia*, 2016. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.117.

[13] C. Pronello, C. Camusso, and R. Valentina, "Last mile freight distribution and transport operators' needs: Which targets and challenges?," in *Transportation Research Procedia*, 2017. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.464.

[14] M. Babagolzadeh, A. Shrestha, B. Abbasi, Y. Zhang, A. Woodhead, and A. Zhang, "Sustainable cold supply chain management under demand uncertainty and carbon tax regulation," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 80, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102245.

[15] T. Ning, L. An, and X. Duan, "Optimization of cold chain distribution path of fresh agricultural products under carbon tax mechanism: A case study in China," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 40, no. 6, 2021, doi: 10.3233/JIFS-201241.

[16] Q. Yao, S. Zhu, and Y. Li, "Green Vehicle-Routing Problem of Fresh Agricultural Products Considering Carbon Emission," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 14, 2022, doi: 10.3390/ijerph19148675.

[17] K. T. Malladi and T. Sowlati, "Impact of carbon pricing policies on the cost and emission of the biomass supply chain: Optimization models and a case study," *Appl Energy*, vol. 267, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115069.

[18] W. Ahmed and B. Sarkar, "Management of next-generation energy using a triple bottom line approach under a supply chain framework," *Resour Conserv Recycl*, vol. 150, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104431.

[19] K. Govindan, F. Salehian, H. Kian, S. T. Hosseini, and H. Mina, "A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach," *Int J Prod Econ*, vol. 257, 2023, doi: 10.1016/j.ijpe.2023.108771.

[20] S. Kuppusamy, M. J. Magazine, and U. Rao, "Impact of downstream emissions cap-and-trade policy on electric vehicle and clean utility adoption," *Transp*

Res E Logist Transp Rev, vol. 180, 2023, doi: 10.1016/j.tre.2023.103353.

[21] J. L. Arroyo, Á. Felipe, M. T. Ortuño, and G. Tirado, "Effectiveness of carbon pricing policies for promoting urban freight electrification: analysis of last mile delivery in Madrid," *Cent Eur J Oper Res*, vol. 28, no. 4, 2020, doi: 10.1007/s10100-019-00627-y.

[22] J. Wang, J. Meng, H. Li, and X. Xu, "Analysis of regional electric vehicle aggregation response behavior in the coupling electricity and carbon markets," *Energy*, vol. 326, p. 135914, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.ENERGY.2025.135914.

Session N°10 – Track N°2

Network Design and Location

Chair: Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
Place: G6-055
Time: 10:00 – 11:15

Un Problema Estocástico de Localización y Protección de Hubs con Capacidad

Time: 10:00 – 10:15
Authors:

- Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*
- Méndez-Vogel, G. *(Universidad Andrés Bello)*
- Marianov, V. *(Pontificia Universidad Católica de Chile)*

Un Problema de Localización y Fortificación de Hubs de Máxima Cobertura Post-Disrupción

Time: 10:20 – 10:35
Authors:

- Quiliche-López, A. *(Universidad Andrés Bello)*
- Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*

Un Esquema Integrativo de Simulación y Optimización para el Diseño de Redes de la Cadena de Suministro Considerando el Efecto Látigo

Time: 10:40 – 10:55
Authors:

- Olivares-Alvarez, L. *(Universidad Católica del Norte)*
- Miranda-González, P. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
- Cannella, S. *(Università di Catania)*

Un Enfoque Metodológico para el Diseño Resiliente de Redes de Cadena de Suministro: Selección y Evaluación de Estrategias ante Disrupciones

Time: 11:00 – 11:15
Authors:

- Peralta-González, J. *(Universidad Católica del Norte)*
- Tapia-Ubeda, F. *(Universidad Católica del Norte)*
- Olivares-Benitez, E. *(Universidad Panamericana)*
- Lüer-Villagra, A. *(Universidad Andrés Bello)*

Un problema estocástico de localización y protección de hubs con capacidad

1st Armin Lüer-Villagra
Depto. de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Talcahuano, Chile
armin.luer@unab.cl

2nd Gonzalo Méndez-Vogel
Depto. de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
gonzalo.mendez@unab.cl

3rd Vladimir Marianov
Depto. de Ingeniería Eléctrica
Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería
Santiago, Chile
marianov@uc.cl

***Resumen*—El diseño de redes hub-and-spoke resilientes ha sido explorado en la literatura, principalmente a través de consideraciones de confiabilidad y modelos de interdicción, entre otros. En la mayoría de los casos, las estrategias de ataque y defensa son determinísticas y conocidas por tanto el atacante como el defensor. Solo unos pocos trabajos han considerado la interdicción de tamaño desconocido.**

En este trabajo se formula y resuelve un problema de localización y protección de hubs con ataques o disrupciones de tamaño desconocido. Una compañía busca diseñar y proteger su red hub-and-spoke minimizando sus costos totales, mientras que uno o más atacantes buscan generar la máxima disrupción en esta en distintos escenarios.

El modelo resultante es binivel entero mixto, que se resuelve mediante una especialización de una técnica de la literatura, a la que se agrega una serie de mejoras computacionales, dada la dificultad del problema.

Los resultados preliminares muestran la relevancia de considerar disrupciones de tamaño desconocido en las decisiones de localización, diseño y protección. Se considera como trabajo futuro la extensión a problemas existentes de este nuevo enfoque.

I. Introducción

Los problemas de localización de hubs pertenecen a la clase denominada *general network design* [1] y son un área que ha crecido progresivamente desde sus inicios [2]–[6], como las múltiples y frecuentes revisiones de literatura dan cuenta, por ejemplo, [7]–[10].

Los problemas de localización de hubs buscan diseñar una topología de red especial denominada hub-and-spoke, donde la demanda de transporte, definida por pares origen-destino, debe ser transportada a través de un tipo de instalación especial denominada hub, donde los flujos son clasificados, ordenados y consolidados.

Las redes hub-and-spoke son comúnmente usadas por aerolíneas que transportan pasajeros o carga, empresas de transporte marítimo, sistemas de correo postal, empresas de telecomunicaciones, etc.

Actualmente existen múltiples líneas de trabajo activo, tales como modelos competitivos, el desarrollo de técnicas de resolución eficientes, la incorporación de múltiples periodos de tiempo, múltiples modos de transporte, etc. Una de esas líneas de trabajo es el desarrollo de redes hub-and-spoke resilientes.

Los principales enfoques han consistido en robustecer las redes resultantes [11], [11]–[13], incorporar la incerteza en parámetros relevantes [14], [15], o bien plantear el problema como uno de protección e interdicción [16]–[18].

En el caso de los problemas de protección e interdicción, es común que se defina a priori una cantidad fija de instalaciones a ser localizadas, protegidas y atacadas/interdictadas. Este trabajo busca resolver un problema donde no se conoce con certeza la cantidad de hubs a ser atacados.

II. El problema

Estudiamos el problema que enfrentaría una compañía que busca diseñar una red hub-and-spoke que puede estar bajo una o más potenciales amenazas a la operación de la red. La compañía debe determinar la ubicación de sus p hubs con capacidad limitada de atender flujo entrante, la protección de q de ellos, mientras considera las potenciales amenazas a su operación.

La compañía enfrenta a uno o más atacantes cuyas acciones pueden degradar la operación de la red en un entorno incierto. No posee conocimiento de la estrategia de ataque que se usará, pero cuenta con un conjunto de escenarios S, donde el escenario $s \in S$ posee una probabilidad de ocurrencia p_s. En dicho escenario, el atacante interdicta o ataca a lo más s hubs de la red de la compañía.

El objetivo de la compañía es minimizar los costos de transporte de flujo pre-interdicción, similares a los presentes en un modelo fundamental de localización de hubs, más los costos esperados de disrupción de la demanda, entendidos como un costo por demanda insatisfecha. En contraste, el atacante busca maximizar los costos esperados de disrupción de la demanda.

III. Formulación matemática

Conjuntos:

- N: nodos de la red.
- A: arcos de la red.
- $H \subseteq N$: posibles localizaciones factibles para los hubs.
- S: cantidades de hubs a ser atacados.
- $\mathcal{C} \subset N \times N$: commodities o pares OD.

Parámetros:

- p: cantidad de hubs a ser localizados
- q: cantidad de hubs a ser protegidos
- c_{ij}: costo unitario del arco $(i, j) \in A$.

- χ: factor de descuento de recolección.
- α: factor de descuento de transmisión.
- δ: factor de descuento de distribución.
- $C_{ijkm} := \chi c_{ik} + \alpha c_{km} + \delta c_{mj}$: costo unitario de la ruta $i \to k \to m \to j$.
- w_{ij}: demanda de transporte para el par OD $(i,j) \in \mathcal{C}$.
- u_{ij}: costo unitario por demanda insatisfecha por ataques para el par OF $(i,j) \in \mathcal{C}$.
- p_s: probabilidad de que $s < p \in S$ hubs sean atacados.

Variables de decisión:

- Y_k: 1, si se localiza un hub en $k \in H$; 0, en otro caso.
- X_{ijkm}: 1, si el tráfico del par OD $(i,j) \in \mathcal{C}$ pasa a través de los hubs $k, m \in H$, en ese orden; 0, en otro caso.
- Z_{ijk}: 1, si el tráfico del par OD $(i,j) \in \mathcal{C}$ pasa a través del hub en k.
- F_k: 1, si el hub en $k \in H$ es protegido; 0, en otro caso.
- I_k^s: 1, si el hub en $k \in H$ resulta afectado en el escenario en que $s \in S$ hubs son atacados; 0, en otro caso.
- A_{ij}^s: 1, si el par OD (i,j) es afectado si $s \in S$ hubs son atacados; 0, en otro caso.

Variables derivadas:

- $V_{ijk}^s := Z_{ijk} I_k^s$: 1, si el tráfico del par OD $(i,j) \in \mathcal{C}$ pasa a través del hub en $k \in H$, que resulta afectado en $s \in S$; 0, en otro caso.

Modelo:

$$\min \sum_{(i,j)} \sum_{k,m} C_{ijkm} w_{ij} X_{ijkm} + \sum_s p_s \sum_{(i,j)} u_{ij} w_{ij} A_{ij}^s \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_k Y_k = p \quad (2)$$

$$\sum_{k,m} X_{ijkm} = 1, \forall (i,j) \quad (3)$$

$$\sum_m X_{ijkm} \leq Y_k, \forall (i,j), k \quad (4)$$

$$\sum_k X_{ijkm} \leq Y_m, \forall (i,j), m \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j)} \sum_m w_{ij} X_{ijkm} \leq a_k Y_k, \forall k \quad (6)$$

$$Z_{ijk} = \sum_{m \neq k} (X_{ijkm} + X_{ijmk}) + X_{ijkk}, \forall (i,j), k \quad (7)$$

$$F_k \leq Y_k, \forall k \quad (8)$$

$$\sum_k F_k = q \quad (9)$$

$$\phi(F,Y,Z) \leq \sum_s p_s \sum_{(i,j)} u_{ij} w_{ij} A_{ij}^s \quad (10)$$

Dominio de variables de decisión

Donde (1) es la función objetivo de la compañía, la minimización de los costos totales de transporte más los costos esperados por demanda insatisfecha. La expresión (2) asegura que se localicen p hubs. Las restricciones (3) aseguran que toda la demanda sea asignada. Por otra parte, las restricciones (4) y (5) permiten que la demanda solo sea asignada a rutas con hubs localizados. Las restricciones (7) aseguran que las variables Z tomen valores apropiados, es decir, los hubs usados por cada par OD. Las restricciones (8) y (9) aseguran la protección de q hubs localizados. Finalmente (10) asegura que la solución del problema del nivel inferior (ataque) es óptimo, donde $\phi(F,Y,Z)$ es la solución del problema de los atacantes siguiente,

$$\phi(F,Y,Z) = \text{máx} \sum_s p_s \sum_{(i,j)} u_{ij} w_{ij} A_{ij}^s \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \sum_k I_k^s = s\,(p - q - s)^+, \forall s \quad (12)$$

$$I_k^s \leq Y_k - F_k, \forall k, s \quad (13)$$

$$A_{ij}^s \geq V_{ijk}^s, \forall (i,j), k, s \quad (14)$$

$$A_{ij}^s \leq \sum_k V_{ijk}^s, \forall (i,j), s \quad (15)$$

$$V_{ijk}^s \leq Z_{ijk}, \forall (i,j), k, s \quad (16)$$

$$V_{ijk}^s \leq I_k^s, \forall (i,j), k, s \quad (17)$$

$$V_{ijk}^s \geq Z_{ijk} + I_k^s - 1, \forall (i,j), k, s \quad (18)$$

Dominio de variables de decisión

La función objetivo (11) maximiza los costos esperados por demanda insatisfecha. Las restricciones (12) aseguran que la cantidad correcta de hubs sea atacada en cada escenario[1]. Las restricciones (13) permiten que solo hubs localizados y desprotegidos sean atacados. Las expresiones (14) marcan un par OD como afectado en un escenario si un hub en particular es usado por dicho par y es atacado. De forma similar, las expresiones (15) permiten marcar un par OD como afectado en un escenario solo si dicho par usa un hub que fue atacado. Las expresiones (16)-(18) son los equivalentes lineales de $V_{ijk}^s := Z_{ijk} I_k^s$. El modelo resultante es binivel entero mixto [19].

IV. Implementación computacional

Para resolverlo se usa la metodología de [19], [20], que parte resolviendo la *High point relaxation (HPR)*, que es la función objetivo del nivel superior y las restricciones de ambos niveles, usando un optimizador de programación lineal entera mixta. La ramificación y poda de soluciones fraccionales se deja a criterio del optimizador.

Al llegar a una solución entera factible de la HPR, se debe verificar si es binivel factible, es decir, que el valor de la función objetivo del nivel inferior es el óptimo. Si lo es, se acepta dicha solución como incumbente y en caso contrario se rechaza y se continúa explorando el espacio de soluciones.

Además se implementan algunas técnicas de aceleración, tales como la resolución por escenarios del problema del

[1]Definimos a^+ como uno si $a > 0$ y cero en otro caso.

nivel inferior y uso de una caché de soluciones del problema inferior, para ahorrar tiempo en operaciones repetitivas o que son intrínsecamente separables.

El método fue implementado en C++ junto con la API de CPLEX 22.1.1 y las distintas *callbacks* disponibles, que facilitan implementar la lógica propuesta por [19], [20].

V. Trabajo en progreso

Encontramos que las técnicas de aceleración son efectivas en su conjunto, entregando soluciones óptimas o cercanas en tiempos razonables.

Actualmente se encuentran en progresos experimentos computacionales extensos para comprender de mejor forma el comportamiento del modelo a sus parámetros de entrada y el efecto de cada técnica de aceleración en el desempeño computacional del procedimiento de resolución.

Referencias

[1] I. Contreras and E. Fernández, "General network design: A unified view of combined location and network design problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 219, pp. 680–697, 6 2012.

[2] A. J. Goldman, "Optimal locations for centers in a network," *Transportation Science*, vol. 3, pp. 352–360, 1969.

[3] M. E. O'Kelly, "The location of interacting hub facilities," *Transportation Science*, vol. 20, pp. 92–106, 1986.

[4] M. E. O'Kelly, "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities," *European Journal of Operational Research*, vol. 32, pp. 393–404, 1987.

[5] J. F. Campbell, "Location and allocation for distribution systems with transshipments and transportion economies of scale," *Annals of Operations Research*, vol. 40, pp. 77–99, 1992.

[6] J. F. Campbell, "Integer programming formulations of discrete hub location problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 72, pp. 387–405, 1994.

[7] J. F. Campbell and M. E. O'Kelly, "Twenty-five years of hub location research," *Transportation Science*, vol. 46, pp. 153–169, 2012.

[8] R. Z. Farahani, M. Hekmatfar, A. B. Arabani, and E. Nikbakhsh, "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications," 2013.

[9] I. Contreras and M. O'Kelly, *Hub Location Problems*, pp. 327–363. Springer International Publishing, 2019.

[10] S. A. Alumur, J. F. Campbell, I. Contreras, B. Y. Kara, V. Marianov, and M. E. O'Kelly, "Perspectives on modeling hub location problems," 5 2021.

[11] C. A. Zetina, I. Contreras, J. F. Cordeau, and E. Nikbakhsh, "Robust uncapacitated hub location," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 106, pp. 393–410, 12 2017.

[12] S. Wang, Z. Chen, and T. Liu, "Distributionally robust hub location," *Transportation Science*, vol. 54, pp. 1189–1210, 5 2020.

[13] G. Taherkhani, S. A. Alumur, and M. Hosseini, "Robust stochastic models for profit-maximizing hub location problems," *Transportation Science*, vol. 55, pp. 1322–1350, 2021.

[14] I. Contreras, J. F. Cordeau, and G. Laporte, "Stochastic uncapacitated hub location," *European Journal of Operational Research*, vol. 212, pp. 518–528, 8 2011.

[15] T. H. Yang and T. Y. Chiu, "Airline hub-and-spoke system design under stochastic demand and hub congestion," *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2 2015.

[16] P. Ramamoorthy, S. Jayaswal, A. Sinha, and N. Vidyarthi, "Hub interdiction & hub protection problems: Model formulations & exact solution methods," tech. rep., Indian Institute of Management Ahmedabad, Research and Publication Department, 2016.

[17] P. Ramamoorthy, S. Jayaswal, A. Sinha, and N. Vidyarthi, "Multiple allocation hub interdiction and protection problems: Model formulations and solution approaches," *European Journal of Operational Research*, vol. 270, pp. 230–245, 10 2018.

[18] P. Ramamoorthy, S. Jayaswal, A. Sinha, and N. Vidyarthi, "An exact method for trilevel hub location problem with interdiction," *European Journal of Operational Research*, vol. 319, pp. 696–710, 12 2024.

[19] M. Fischetti, I. Ljubić, M. Monaci, and M. Sinnl, "A new general-purpose algorithm for mixed-integer bilevel linear programs," *Operations Research*, vol. 65, pp. 1615–1637, 2017.

[20] M. Fischetti, I. Ljubić, M. Monaci, and M. Sinnl, "On the use of intersection cuts for bilevel optimization," *Mathematical Programming*, vol. 172, pp. 77–103, 2018.

Un problema de localización y fortificación de hubs de máxima cobertura post-disrupción

1st Aron Quiliche-López
Mg. en Cs. de la Ing. m. Log. y G.O.
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
a.quilichelopez@uandresbello.edu

2nd Armin Lüer-Villagra
Departamento de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Talcahuano, Chile
armin.luer@unab.cl

***Resumen*—Las redes hub-and-spoke son relevantes para industrias tales como la paquetería courier, las aerolíneas, etc. Estas redes poseen ventajas económicas y operativas de su operación al poder sacar partido de economías de escala, dada la consolidación de flujo entre los hubs. Esto, a su vez, hace que el flujo se concentre en pocos arcos de la red. Esto hace que sea relevante proteger parte de la red, de tal forma que ésta sea resiliente a fallas o ataques.**

En este trabajo se formula y resuelve un problema de localización y protección de hubs, donde una compañía busca diseñar una red hub-and-spoke de p hubs, proteger q de ellos, suponiendo que un atacante buscará inhabilitar r de ellos. El objetivo de la compañía es maximizar el flujo que puede ser atendido dado un estándar de cobertura tras el ataque, mientras que el atacante busca minimizar dicha cantidad.

El problema se formula como un modelo de programación binivel lineal binario, que se resuelve mediante una adaptación de una técnica computacional presente en la literatura.

Los resultados preliminares muestran la eficacia de nuestro enfoque, generando redes más resistentes a ataques y fallas, y donde los modelos resultantes pueden ser resueltos en tiempos razonables. Como trabajo futuro se espera explorar otros problemas de localización de hubs, considerar otras métricas de cobertura, etc.

***Index Terms*—localización, hubs, fortificación, cobertura, interdicción**

I. Introducción

Los hubs son instalaciones intermedias fundamentales para el funcionamiento eficiente de redes de transporte estructuradas bajo la topología hub-and-spoke, ampliamente utilizada en el ámbito del transporte aéreo, correo postal y courier, por sus beneficios operacionales y económicos. Desde sus inicios, ver [1]–[4], los problemas de localización de hubs han despertado gran interés académico y práctico, lo que se muestra en la gran cantidad de trabajo al respecto, por ejemplo [5]–[8] y las referencias ahí contenidas.

De igual forma que los problemas de localización, ver [9], los problemas de hubs se pueden clasificar según su estructura y función objetivo en problemas de mediana, centro, con costos fijos y de cobertura [4].

Los problemas de cobertura de hubs han sido estudiados bastante en el pasado, llevando a formulaciones y procedimientos de resolución eficientes [10]–[14].

No obstante, debido al rol central de los hubs en los sistemas de transporte, esto los convierte en puntos críticos vulnerables a disrupciones intencionales. Esto comúnmente se ha tratado en la literatura buscando obtener redes más robustas [15], [15]–[17] o bien plantear el problema como uno de protección e interdicción [18]–[20], donde existen al menos dos agentes que compiten con objetivos contratiempos: un defensor que busca mantener la operación de la red y un atacante que busca generar disrupciones.

Se observa que los problemas de cobertura de hubs no han sido estudiados desde la perspectiva de los problemas de protección e interdicción.

Por esto, este estudio aborda un problema de localización y fortificación de hubs de máxima cobertura post-disrupción.

II. El problema

Una empresa busca diseñar una red hub-and-spoke para el transporte aéreo de pasajeros. La zona bajo estudio puede ser representada por un grafo $G = (N, A)$ donde $N = \{1, 2, \ldots, ..., n\}$ es el conjunto de nodos, y $A \subset N^2 0$ es el conjunto de arcos. Se conoce la demanda de transporte entre cada nodo origen $i \in N$ y destino $j \in N$, denotada w_{ij}.

Por otra parte, para todo arco $(i, j) \in A$ se conoce su tiempo de tránsito, denominado t_{ij}. La demanda se considera cubierta para un par origen-destino O/D si su tiempo total no supera un umbral de tiempo T.

Se debe diseñar una red hub-and-spoke de p hubs en alguno de los lugares del conjunto $H \subseteq N$, pudiendo proteger q de ellos. Se espera que la red sea capaz de mantener un nivel adecuado de servicio incluso después de sufrir disrupciones causadas por ataques y/o fallas de los hubs.

Para esto, la empresa toma en cuenta las acciones de un potencial atacante durante la fase de diseño. El atacante busca minimizar la demanda que es capturada y servida tras la disrupción atacando r hubs en la red de la empresa.

III. El modelo

Se propone una formulación de programación binivel entera-mixta, donde el nivel superior busca maximizar el flujo que puede ser atendido post-disrupción. Se cuenta con variables de decisión de localización y fortificación. Las restricciones aseguran que se localicen p hubs, se protejan q de ellos y que el flujo sea capturado si existe una ruta post-disrupción válida cuyo tiempo esté bajo el umbral T.

En el nivel inferior se busca minimizar el flujo que puede ser atendido post-disrupción. Cuenta con variables de interdicción y restricciones que evitan la interdicción de un hub protegido o inexistente y limitan a r los hubs interdictados.

IV. Método de solución

El modelo se resuelve mediante un algoritmo exacto Branch-and-Bound con las modificaciones propuestas por [21], [22], lo que permitió encontrar soluciones óptimas de forma eficiente con tiempos de cómputo moderados. El método de resolución se implementa en Python 3.10 con la API respectiva de CPLEX 22.1.

V. Experimentos computacionales

Se realizaron experimentos computacionales utilizando instancias derivadas del reconocido dataset CAB. Además, se desarrolló un análisis de sensibilidad detallado sobre los principales parámetros del modelo, como el número de hubs a localizar (p), proteger (q) e interdictar (r), así como el umbral de cobertura (T).

Los resultados muestran que la red presenta alta vulnerabilidad en ausencia de estrategias de fortificación, mientras que la protección selectiva de hubs clave mitiga significativamente el impacto de eventos disruptivos sobre el desempeño de la red. En particular, se observó que redes operando con umbrales de cobertura moderados presentan mejoras relevantes en la cobertura al incrementar la cantidad de hubs localizados y protegidos. En contraste, cuando el umbral de cobertura es muy bajo (entregas locales) o muy alto (entregas extensas), los beneficios marginales de aumentar o se vuelven poco significativos. Finalmente, los escenarios sin protección estratégica de hubs clave evidenciaron caídas significativas en el nivel de cobertura frente a ataques deliberados (interdicciones), lo que reafirma la importancia de incorporar decisiones de fortificación en la fase de diseño de redes críticas.

VI. Conclusiones

En conjunto, este estudio contribuye con un enfoque metodológico robusto para el diseño de infraestructuras críticas resilientes, ofreciendo una herramienta adaptable a diversos sistemas expuestos a ataques deliberados, como redes logísticas, de transporte o telecomunicaciones. Su aplicabilidad trasciende el ámbito aéreo, abriendo oportunidades para el desarrollo de estrategias de protección en otras redes vulnerables frente eventos disruptivos.

Referencias

[1] M. E. O'Kelly, "The location of interacting hub facilities," *Transportation Science*, vol. 20, pp. 92–106, 1986.

[2] M. E. O'Kelly, "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities," *European Journal of Operational Research*, vol. 32, pp. 393–404, 1987.

[3] J. F. Campbell, "Location and allocation for distribution systems with transshipments and transportion economies of scale," *Annals of Operations Research*, vol. 40, pp. 77–99, 1992.

[4] J. F. Campbell, "Integer programming formulations of discrete hub location problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 72, pp. 387–405, 1994.

[5] R. Z. Farahani, M. Hekmatfar, A. B. Arabani, and E. Nikbakhsh, "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications," 2013.

[6] J. F. Campbell and M. E. O'Kelly, "Twenty-five years of hub location research," *Transportation Science*, vol. 46, pp. 153–169, 2012.

[7] I. Contreras and M. O'Kelly, *Hub Location Problems*, pp. 327–363. Springer International Publishing, 2019.

[8] S. A. Alumur, J. F. Campbell, I. Contreras, B. Y. Kara, V. Marianov, and M. E. O'Kelly, "Perspectives on modeling hub location problems," 5 2021.

[9] M. S. Daskin, *Introduction to Location Theory and Models*, ch. 1, pp. 1–28. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

[10] B. Y. Kara and B. C. Tansel, "The single-assignment hub covering problem: Models and linearizations," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 54, no. 1, pp. 59–64, 2003.

[11] B. Wagner, "Model formulations for hub covering problems," *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 59, no. 7, pp. 932–938, 2008.

[12] S. Alumur and B. Y. Kara, "A hub covering network design problem for cargo applications in turkey," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 60, no. 10, pp. 1349–1359, 2009.

[13] H. Karimi and M. Bashiri, "Hub covering location problems with different coverage types," *Scientia Iranica*, vol. 18, no. 6, pp. 1571–1578, 2011.

[14] M. Peker and B. Y. Kara, "The p-hub maximal covering problem and extensions for gradual decay functions," *Omega*, vol. 54, pp. 158–172, 2015.

[15] C. A. Zetina, I. Contreras, J. F. Cordeau, and E. Nikbakhsh, "Robust uncapacitated hub location," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 106, pp. 393–410, 12 2017.

[16] S. Wang, Z. Chen, and T. Liu, "Distributionally robust hub location," *Transportation Science*, vol. 54, pp. 1189–1210, 5 2020.

[17] G. Taherkhani, S. A. Alumur, and M. Hosseini, "Robust stochastic models for profit-maximizing hub location problems," *Transportation Science*, vol. 55, pp. 1322–1350, 2021.

[18] P. Ramamoorthy, S. Jayaswal, A. Sinha, and N. Vidyarthi, "Hub interdiction & hub protection problems: Model formulations & exact solution methods," tech. rep., Indian Institute of Management Ahmedabad, Research and Publication Department, 2016.

[19] P. Ramamoorthy, S. Jayaswal, A. Sinha, and N. Vidyarthi, "Multiple allocation hub interdiction and protection problems: Model formulations and solution approaches," *European Journal of Operational Research*, vol. 270, pp. 230–245, 10 2018.

[20] P. Ramamoorthy, S. Jayaswal, A. Sinha, and N. Vidyarthi, "An exact method for trilevel hub location problem with interdiction," *European Journal of Operational Research*, vol. 319, pp. 696–710, 12 2024.

[21] M. Fischetti, I. Ljubić, M. Monaci, and M. Sinnl, "A new general-purpose algorithm for mixed-integer bilevel linear programs," *Operations Research*, vol. 65, pp. 1615–1637, 2017.

[22] M. Fischetti, I. Ljubić, M. Monaci, and M. Sinnl, "On the use of intersection cuts for bilevel optimization," *Mathematical Programming*, vol. 172, pp. 77–103, 2018.

Un esquema integrativo de simulación y optimización para el diseño de redes de la cadena de suministro considerando el efecto látigo

1st Luis Olivares-Alvarez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
0000-0002-5346-8999

2nd Pablo A. Miranda-Gonzalez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
0000-0003-4885-4200

3rd Francisco J. Tapia-Ubeda
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
0000-0003-0688-8904

4th Salvatore Cannella
Departamento de Ingeniería Civil y Arquitectura
Universidad de Catania
Catania, Italia
0000-0002-6946-4650

***Abstract*—Los modelos tradicionales de Diseño de Redes de Cadenas de Suministro, tales como los Problemas de Localización de Instalaciones o más recientemente los Problemas de Localización con Inventarios, no abordan el Efecto Látigo (EfL), un fenómeno ampliamente estudiado en la literatura de la gestión de la cadena de suministros. Lo anterior puede resultar en diseños de red potencialmente sub-óptimos. Para abordar esta problemática, se presenta un enfoque de modelamiento y resolución iterativo de simulación y optimización, el cual integra el EfL dentro del proceso de diseño. Esta propuesta proporciona a los tomadores de decisiones una herramienta más realista y eficaz para diseñar cadenas de suministro, logrando configuraciones de red mejoradas y evaluaciones del EfL más precisas en comparación con enfoques previamente desarrollados.**

***Index Terms*—Diseño de Redes de Cadenas de Suministro, Efecto Látigo, Problema de Localización con Inventario, Simulación y Optimización**

I. Introducción y revisión de literatura

El Diseño de Redes de Cadenas de Suministro (DRCS) representa un problema estratégico fundamental en la gestión de la cadena de suministros [1], impactando directamente la eficiencia a largo plazo y la competitividad de las organizaciones. Tradicionalmente, las decisiones del DRCS se han abordado mediante modelos matemáticos, tales como los Problemas de Localización con Inventarios (PLI) [2], que buscan optimizar costos asociados a la estructura y la gestión del inventario de la red. Sin embargo, estos enfoques a menudo simplifican e ignoran fenómenos dinámicos cruciales que afectan el rendimiento de la cadena.

Uno de estos fenómenos es el EfL [3], definido como la amplificación de la variabilidad de la demanda aguas arriba en la cadena de suministro. El EfL genera ineficiencias significativas, manifestándose en excesos de inventario, desabastecimientos, subutilización de capacidades y un aumento de los costos operativos, que pueden incrementarse entre un 10% y un 30% [4]. Hoy en día se ha convertido en uno de los fenómenos más estudiados en las ciencias de la gestión [5].

La limitación fundamental en los enfoques actuales de DRCS radica en su incapacidad para tratar el EfL como el fenómeno inherentemente dinámico que es. La magnitud del EfL está intrínsecamente ligada a la configuración específica de la red diseñada [6] (bodegas y asignación de clientes). Los modelos PLI existentes, en el mejor de los casos, incorporan el EfL mediante aproximaciones estáticas o cotas inferiores [7], lo que no logra capturar la dinámica entre la estructura de la red y la amplificación de la varianza resultante. Ignorar esta naturaleza dinámica conduce inevitablemente a una subestimación de los costos reales y a diseños de red que pueden ser frágiles e ineficientes en la práctica.

Para abordar esta necesidad, se propone un esquema integrativo [8] que combina optimización matemática y simulación dinámica para el DRCS. Esta propuesta integra un modelo PLI con un modelo de simulación de eventos discretos que evalúa rigurosamente el EfL. La información simulada del EfL retroalimenta el modelo de optimización en un ciclo iterativo, refinando el DRCS para considerar explícitamente la dinámica del EfL. El objetivo no es reducir el EfL, sino cuantificarlo dinámicamente para una evaluación más realista de costos y rendimiento, buscando un equilibrio decisional óptimo.

El resto del documento describe el problema abordado (Sección II), detalla la metodología colaborativa de simulación-optimización (Sección III) y presenta los resultados preliminares, conclusiones y trabajos futuros (Sección IV).

II. Problema abordado

Este estudio aborda un problema de DRCS de dos eslabones, en el cual una única planta actúa como fuente primaria de productos, abasteciendo a un conjunto de ubicaciones

potenciales para bodegas. Estas bodegas deben satisfacer las demandas de un conjunto de clientes existentes. Por otro lado, se considera una política de revisión periódica (R, S), ampliamente adoptada por su simplicidad y aplicabilidad [9]. Bajo esta política, existe un nivel de inventario objetivo (S) y un período de revisión de inventarios (R). El objetivo es generar un diseño de la red que minimice los costos totales del sistema, equilibrando los costos asociados con la estructura física (localización de instalaciones y asignación de clientes) con los costos asociados a la gestión de inventarios en cada almacén (costos de pedido, de inventario de ciclo y de seguridad). Adicionalmente, se considera la presencia del EfL como un factor de diseño.

Se toma como base el modelo presentado en [7], el cual incorpora y mide el impacto del EfL considerando la propuesta de modelamiento de [10]. No obstante, se reconoce que la magnitud del EfL es intrínsecamente dinámica y aleatoria, el cual a su vez es dependiente de la configuración de la red. De este modo, se propone un esquema integrativo entre un modelo de optimización matemática y un modelo de simulación de eventos discretos.

A. Modelo de optimización matemática

El modelo propuesto, adaptado de [9] y extendido en [7], es un PLI diseñado para determinar la configuración óptima de la red junto con las variables de su política de inventario (R, S). Este modelo considera una cadena de suministros de dos eslabones con una planta central fija, N candidatos a bodega y M clientes con una demanda estocástica (μ_j, σ_j^2).

La función objetivo (1) busca minimizar los costos totales de la red compuestos por: Costos fijos de apertura y operación de bodegas (FC_i), costos de transporte entre bodegas y clientes (AC_{ij}). Adicionalmente, cada bodega tendrá costos por pedir una orden (OC_i) y por mantener una unidad de inventario (HC_i), considerando un nivel de servicio $Z_{1-\alpha}$. De este modo, se busca decidir si se instala o no la bodega i (X_i), la asignación de cada cliente j a cada bodega instalada i (Y_{ij}) y la cantidad pedida por cada bodega instalada i a la planta central (Q_i).

$$\begin{aligned}\min & \sum_{i=1}^{N} FC_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} AC_{ij} \cdot D_j \cdot Y_{ij} \\ & + \sum_{i=0}^{N} X_i \left(\frac{OC_i \cdot D_i}{Q_i} + \frac{HC_i \cdot Q_i}{2} \right) \\ & + \sum_{i=0}^{N} X_i \left(HC_i \cdot Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{R_i + LT_i} \cdot \sqrt{V_i} \right) \end{aligned} \tag{1}$$

Adicionalmente, el modelo presenta las siguientes restricciones: (2) y (3) aseguran que cada cliente esté asignado a una única bodega previamente instalada. Las expresiones (4) y (5) permiten cuantificar la demanda y varianza agregada que recibe cada bodega instalada, mientras que (6) y (7) para la planta central. Note que, existe un parámetro β_i asociado a la varianza percibida por la planta central el cual representa la distorsión de la demanda presente en cada bodega instalada. La expresión (8) permite cuantificar el tamaño de lote esperado para cada bodega instalada. Finalmente, la restricción (9) representa la naturaleza de las variables.

s.t.:

$$\sum_{i=1}^{N} Y_{ij} = 1 \qquad \forall j = 1, \ldots, M \tag{2}$$

$$Y_{ij} \leq X_i \qquad \forall i = 1, \ldots, N, \forall j = 1, \ldots, M \tag{3}$$

$$D_i = \sum_{j=1}^{M} Y_{ij} \cdot \mu_j \qquad \forall i = 1, \ldots, N \tag{4}$$

$$V_i = \sum_{j=1}^{M} Y_{ij} \cdot \sigma_j^2 \qquad \forall i = 1, \ldots, N \tag{5}$$

$$D_0 = \sum_{i=1}^{N} D_i \tag{6}$$

$$V_0 = \sum_{i=1}^{N} \beta_i \cdot V_i \tag{7}$$

$$Q_i = D_i \cdot R_i \qquad \forall i = 0, \ldots, N \tag{8}$$

$$X_i, Y_{ij} \in 0, 1 \qquad \forall i = 1, \ldots, N, \forall j = 1, \ldots, M \tag{9}$$

B. Modelo de simulación de eventos discretos

Mientras que el modelo matemático proporciona una configuración de red estática, el modelo de simulación de eventos discretos es empleado para cuantificar dinámicamente los valores de β_i. Este componente es esencial para el esquema integrativo, ya que evalúa el rendimiento dinámico de una configuración de red dada bajo condiciones de demanda estocástica y mide con precisión el EfL resultante.

El modelo de simulación representa la red de dos escalones cuya estructura (bodegas localizadas y asignaciones de clientes) es definida por el modelo de optimización matemática. La simulación aísla y opera cada bodega de forma independiente, centrándose en sus clientes asignados y patrones de demanda.

La simulación considera la demanda estocástica de los clientes para generar un conjunto de réplicas del sistema, el cual se evalúa por periodos. En cada periodo, se estima una demanda y varianza pronosticada (utilizando promedios móviles y varianzas móviles con p periodos). Con esta información, se calcula el nivel de inventario objetivo $\hat{S}_i^t$ (ver Ecuación 10) y se realiza el reordenamiento según la regla de Chen [10] presentada en la Ecuación 11.

$$\hat{S}_i^t = \hat{D}_i^t \cdot (R + LT_i) + Z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\hat{V}_i^t \cdot (R + LT_i)} \tag{10}$$

$$O_i^t = \hat{S}_i^t - \hat{S_i^{t-1}} + D_i^{t-1} \tag{11}$$

La cuantificación del EfL (β_i) se realiza mediante el ratio de varianza de pedidos [11], definido como la proporción entre la varianza de los pedidos y la varianza de la demanda (12).

$$\beta = \frac{Var(O_i)}{Var(D_i)} = \frac{\sigma_{O_i}^2}{\sigma_{D_i}^2} \tag{12}$$

III. Metodología

El esquema propuesto integra el modelo de optimización matemática y el modelo de simulación de eventos discretos de manera colaborativa e iterativa. Esta metodología busca encontrar una configuración de la red de la cadena de suministro bajo una mirada estratégica y táctica que minimice los costos totales bajo la influencia de la amplificación de la variabilidad de la demanda (EfL). La metodología procede a través de los siguientes pasos secuenciales, iterando hasta que se cumple un criterio de convergencia, como se ilustra en la Figura 1.

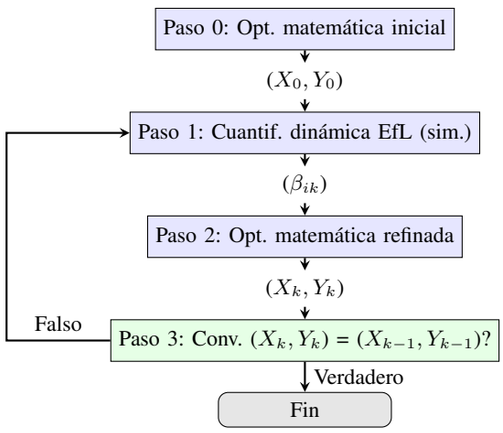


Fig. 1. Pasos de la metodología colaborativa simulación-optimización.

La metodología se articula en un ciclo iterativo de cuatro pasos:

- **Paso 0**: Optimización matemática inicial. Se resuelve el modelo de optimización con valores iniciales de EfL (β_{i0}), obteniendo una configuración preliminar de la red (X_0, Y_0).
- **Paso 1**: Cuantificación dinámica del EfL vía simulación. El modelo de simulación evalúa la configuración de red actual (X_{k-1}, Y_{k-1}) y cuantifica dinámicamente el EfL real, produciendo los valores actualizados (β_{ik}).
- **Paso 2**: Optimización matemática refinada con valores de EfL simulados. El modelo de optimización se resuelve nuevamente, utilizando los β_{ik} obtenidos de la simulación para refinar el diseño de la red, resultando en una nueva configuración (X_k, Y_k).
- **Paso 3**: Criterio de convergencia. El algoritmo se detiene si la configuración de red actual (X_k, Y_k) es idéntica a la de la iteración anterior (X_{k-1}, Y_{k-1}), indicando estabilidad. De lo contrario, se continúa el ciclo.

IV. Resultados, conclusiones y trabajos futuros

El enfoque fue implementado medinate la interfaz Python-Gurobi, mientras que el simulador fue validado bajo la propuesta de [4]. Los resultados preliminares, comparados con [7] bajo las mismas instancias, indican que la aplicación del esquema integrativo de simulación y optimización proporciona valores de EfL más realistas. En comparación con los enfoques estáticos existentes, nuestra metodología ofrece configuraciones de red mejoradas y una evaluación más precisa de los costos reales en la red, lo que se traduce en diseños de cadena de suministro capaces de considerar la variabilidad de la demanda como parte de la cadena. Esto valida y demuestra el valor de un esquema iterativo de simulación y optimización para el DRCS que integra dinámicamente el EfL.

Como trabajos futuros, se propone explorar la incorporación de estrategias activas de mitigación del EfL dentro del esquema propuesto, así como la evaluación del impacto de diferentes políticas de inventario y la extensión del modelo a redes de cadena de suministro con múltiples productos o escalones.

Agradecimientos

Esta investigación fue parcialmente apoyada por la Comisión Europea, en el marco del proyecto ExPliCit (ref.101086465 - HORIZON-MSCA-2021-SE-01-01), por la Universidad de Catania, Italia, a través del programa PIACERI (en el marco del proyecto ISTRICE), por ANID FONDECYT N° 1123046, por el Proyecto Iniciación a la Investigación 2022 de la Universidad Católica del Norte. Número VRIDT N° 055/2022, y por la Iniciativa I+D+i Litio de la Universidad Católica del Norte.

References

[1] I. Puttemans, A. Caris, and K. Braekers, "The integration of location and inventory decisions in supply chain networks: A literature review and future prospects," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 195, 3 2025.

[2] P. A. Miranda and R. A. Garrido, "Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 40, pp. 183–207, 2004.

[3] Lee., V. Padmanabhan, and S. Whang, "Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect," *Management Science*, vol. 43, pp. 546–558, 1997. [Online]. Available: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0031108822partnerID=40md5=1f8d50e65ffb24955a4765c6a920168e

[4] D. C. Chatfield, J. G. Kim, T. P. Harrison, Jack, and C. Hayya, "The bullwhip effect-impact of stochastic lead time, information quality, and information sharing: A simulation study," 2004.

[5] M. Brauch, M. Mohaghegh, and A. Größler, "Causes of the bullwhip effect: a systematic review and categorization of its causes," *Management Research Review*, vol. 47, pp. 1127–1149, 5 2024.

[6] R. Dominguez, S. Cannella, and J. M. Framinan, "The impact of the supply chain structure on bullwhip effect," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, pp. 7309–7325, 12 2015. [Online]. Available: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0307904X15001523

[7] L. Olivares-Alvarez, P. A. Miranda-Gonzalez, F. J. Tapia-Ubeda, and S. Cannella, "Integrating the bullwhip effect into supply chain network design," *"Unpublished manuscript."*, 2026.

[8] G. Figueira and B. Almada-Lobo, "Hybrid simulation-optimization methods: A taxonomy and discussion," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 46, pp. 118–134, 2014.

[9] L. Olivares-Alvarez, P. A. Miranda-Gonzalez, F. J. Tapia-Ubeda, and S. Cannella, "The inventory location problem under periodic inventory control policy (r, s): modeling, solving and analysis," *Optimization and Engineering*, 3 2025. [Online]. Available: https://link.springer.com/10.1007/s11081-025-09963-2

[10] F. Chen, Z. Drezner, J. K. Ryan, and D. Simchi-levi, "Quantifying supply chain : Lead the bullwhip the impact and effect of in a simple forecasting , times , information," *Management Science*, vol. 46, pp. 436–443, 2000.

[11] S. Cannella, A. P. Barbosa-Póvoa, J. M. Framinan, and S. Relvas, "Metrics for bullwhip effect analysis," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 64, pp. 1–16, 2013. [Online]. Available: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1057/jors.2011.139

Un Enfoque Metodológico para el Diseño Resiliente de Redes de Cadena de Suministro: Selección y Evaluación de Estrategias ante Disrupciones

1st Juan Peralta-González
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
juan.peralta@ce.ucn.cl

2nd Francisco Tapia-Ubeda
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Católica del Norte
Antofagasta, Chile
francisco.tapia@ucn.cl

3rd Elías Olivares-Benitez
Facultad de Ingeniería
Universidad Panamericana
Guadalajara, México
eolivaresb@up.edu.mx

4th Armin Lüer-Villagra
Departamento de Ciencias de la Ingeniería
Universidad Andrés Bello
Talcahuano, Chile
armin.luer@unab.cl

***Resumen*—En un entorno global y dinámico, marcado por crecientes niveles de incertidumbre, las cadenas de suministros se ven afectadas por disrupciones cada vez más frecuentes y de alto impacto, comprometiendo directamente su continuidad operacional. Este trabajo propone un enfoque metodológico para el diseño resiliente de redes de cadena de suministro, permitiendo evaluar y seleccionar las estrategias de mitigación de riesgo frente a distintos tipos de disrupciones. La propuesta se divide en tres grandes etapas: Una revisión sistemática de literatura mediante el enfoque PRISMA; la construcción de una herramienta de apoyo al diseño de red, la cual, vincula tipos de disrupciones con estrategias de mitigación según el sector industrial; y la formulación de modelos matemáticos que integren decisiones de diseño de red y enfoques resilientes bajo escenarios disruptivos.**

Keywords*—*Diseño de Red de Cadena de Suministro; Resiliencia; Gestión de Riesgo en la Cadena de Suministro; Revisión Sistemática; Enfoques de optimización

I. Introducción

En un entorno global, las cadenas de suministros se enfrentan cada vez más a disrupciones significativas (e.g., desastres de origen natural, tensiones geopolíticas, pandemias, ciberataques), las cuales amenazan su continuidad operativa [1]. La resiliencia en la cadena de suministro se refiere a la capacidad de una organización, empresa, proceso para resistir, adaptarse y recuperarse de interrupciones, asegurando el cumplimiento de la demanda y el desempeño operativo, entre otros objetivos [2]. La falta de una resiliencia en la cadena de suministro puede ocasionar pérdidas financieras, desajustes entre la demanda y la oferta y alteraciones en los procesos productivos y de gestión [3]. Es por esto, que las cadenas de suministros deben diseñarse de manera que resistan a las interrupciones y puedan recuperarse de las interrupciones rápidamente y a un mínimo costo.

Un diseño de red de cadena de suministro resiliente se basa en cuatro áreas principales: identificar, cuantificar, mitigar y responder. La primera fase consiste en identificar la estructura de la cadena de suministro, evaluar la exposición a riesgos y analizar la red de manera sistemática, reconociendo sus procesos críticos [4]. Una vez identificados los riesgos es necesario cuantificarlos, mediante una evaluación del impacto potencial de las disrupciones mediante métricas claves, como el tiempo estimado de recuperación [5]-[6]. La siguiente etapa se refiere a las estrategias de mitigación de riesgo (e.g., inventarios de seguridad, capacidades ágiles, proveedores de respaldo) [7]-[9]. Si ocurre una disrupción, la respuesta implica responder mediante la implementación de planes de contingencia, redistribución de recursos y la estabilización de la cadena de suministro.

II. Brecha de Investigación

A pesar del amplio estudio en la literatura [10]-[13], existe una brecha metodológica que vincule explícitamente los tipos de disrupción con las estrategias de mitigación de riesgo más adecuadas para el diseño de redes. Asimismo, la mayoría de los estudios carece de un marco que integre dichas estrategias con las capacidades funcionales de resiliencia, considere diferencias sectoriales y permita su evaluación cuantitativa bajo múltiples criterios. Esta investigación aborda dicha brecha mediante la propuesta de un marco metodológico que permita guiar la selección y evaluación de estrategias de mitigación de riesgo, con el objetivo de mejorar la capacidad de recuperación en diversos sectores industriales.

III. Propuesta Metodológica

Nuestra propuesta se divide en tres grandes etapas:

1) Revisión Sistemática de Literatura

En primer lugar, se realiza una revisión sistemática de la literatura bajo el enfoque PRISMA, para identificar, clasificar y comparar tanto los principales tipos de disrupciones que afectan a las diversas organizaciones en una industria en particular, así como también las estrategias de mitigación de riesgo más utilizadas en la literatura (i.e., redundancia, flexibilidad, visibilidad, colaboración, agilidad). La búsqueda se realiza en base de datos como Scopus y WOS, considerando publicaciones desde el año 2003 hasta la fecha. A su vez, contempla la identificación de enfoques de optimización para el modelado del diseño de redes de cadena de suministros resilientes (e.g., programación estocástica, programación robusta, programación multiobjetivo).

2) Apoyo para el diseño de red

En segundo lugar, a partir de la evidencia recopilada, se construye una matriz de correspondencia que vincula cada tipo de disrupción (e.g., desastre de origen natural, tecnológica, geopolítica, entre otros) con las estrategias de mitigación de riesgo que mejor responde a dicha disrupción según evidencia empírica. Esto con el fin de obtener un marco referencial que valide las disrupciones

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

por sector industrial, junto a su estrategia según el tipo de disrupción, proporcionando un apoyo para la priorización estratégica al momento de diseñar la red de cadena de suministro, permitiendo avanzar hacia la integración metodológica entre la clasificación cualitativa de disrupciones y la selección cuantitativa de estrategias.

3) Formulación de modelos matemáticos

Finalmente, se proponen modelos matemáticos de optimización para el diseño de redes de cadena de suministro resilientes. Contemplan de manera explícita decisiones relacionadas con el diseño de red (i.e., localización de centros de distribución, asignación de clientes, gestión de inventario, selección de proveedores) [14]-[15], evaluando distintos escenarios de disrupción con su respectivo nivel de impacto. Se proporciona un marco analítico que analiza configuraciones alternativas de red en función de su capacidad de recuperación y eficiencia operativa.

IV. Trabajo en progreso y futuro

Actualmente, se cuenta con un marco conceptual de construcción teórica y metodológica. Se está llevando a cabo la revisión de literatura, permitiendo identificar y clasificar las diversas estrategias de mitigación de riesgo según sus capacidades funcionales y estructurales, así como tipologías de disrupciones diferenciadas por origen, frecuencia, propagación e impacto. Se espera poder desarrollar la matriz preliminar que vincula dichas estrategias con tipos de disrupciones y sectores industriales.

Una vez finalizada la etapa anterior, se procederá a la formulación conceptual de los modelos cuantitativos de diseño de red resiliente, permitiendo evaluar la efectividad de las distintas configuraciones. Dicha formulación contemplará la incorporación de restricciones operativas, variables multiobjetivo y enfoques flexibles que integren decisiones estratégicas bajo condiciones de incertidumbre.

A diferencia de gran parte de la literatura existente, la cual aborda de manera aislada los tipos de riesgos y las estrategias de mitigación, este trabajo propone un enfoque sistemático que, desde una perspectiva práctica, ofrece a las organizaciones contar con una guía para la toma de decisiones bajo incertidumbre. Dicho enfoque está orientado a potenciar la capacidad de recuperación, minimizar los costos derivados de las disrupciones y consolidar un enfoque sostenible en las operaciones de los diversos sectores industriales.

Referencias

[1] Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. The International Journal of Logistics Management, 15(2), 1–14.

[2] Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2018). Ripple effect in the supply chain: an analysis and recent literature. International Journal of Production Research, 56(1–2), 414–430. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387680

[3] Spiegler, V. L. M., Naim, M. M., & Wikner, J. (2012). A control engineering approach to the assessment of supply chain resilience. International Journal of Production Research, 50(21), 6162–6187. https://doi.org/10.1080/00207543.2012.710764

[4] Aldrighetti, R., Battini, D., Ivanov, D., & Zennaro, I. (2021). Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: A review and future research directions. International Journal of Production Economics, 235. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108103

[5] Garvey, M. D., Carnovale, S., & Yeniyurt, S. (2015). An analytical framework for supply network risk propagation: A Bayesian network approach. European Journal of Operational Research, 243(2), 618–627. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.034

[6] Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. In International Journal of Production Economics (Vol. 103, Issue 2, pp. 451–488). https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006

[7] Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., & Ivanova, M. (2017). Literature review on disruption recovery in the supply chain*. International Journal of Production Research, 55(20), 6158–6174. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1330572J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

[8] Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 125, 285–307. https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.001

[9] Snyder, L. V., Atan, Z., Peng, P., Rong, Y., Schmitt, A. J., & Sinsoysal, B. (2016). OR/MS models for supply chain disruptions: A review. In IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers) (Vol. 48, Issue 2, pp. 89–109). Taylor and Francis Ltd. https://doi.org/10.1080/0740817X.2015.1067735

[10] Katsaliaki, K., Galetsi, P., & Kumar, S. (2022). Supply chain disruptions and resilience: a major review and future research agenda. Annals of Operations Research, 319(1), 965–1002. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03912-1

[11] Ma, C., Zhang, L., You, L., & Tian, W. (2025). A Review of Supply Chain Resilience: A Network Modeling Perspective. In Applied Sciences (Switzerland) (Vol. 15, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/app15010265

[12] Pires Ribeiro, J., & Barbosa-Povoa, A. (2018). Supply Chain Resilience: Definitions and quantitative modelling approaches – A literature review. In Computers and Industrial Engineering (Vol. 115, pp. 109–122). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.11.006

[13] Roshani, A., Walker-Davies, P., & Parry, G. (2024). Designing resilient supply chain networks: a systematic literature review of mitigation strategies. Annals of Operations Research, 341(2–3), 1267–1332. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06228-6

[14] Shen, Z.-J. (2007). Integrated supply chain design models: a survey and future research directions. Journal of Industrial & Management Optimization, 3(1), 1–27. https://doi.org/10.3934/jimo.2007.3.1

[15] Simchi-Levi, David., Kaminsky, Philip., & Simchi-Levi, Edith. (2003). Designing and managing the supply chain : concepts, strategies, and case studies. McGraw-Hill/Irwin.

Session N°10 – Track N°3

Analytics and Artificial Intelligence

Chair: Vairetti, C. *(Universidad de Los Andes)*
Place: G6-056
Time: 10:00 – 11:15

Balanced Depth Map Completion Based on Non-Local means and Infinity Laplacian

Time: 10:00 – 10:15
Author: Lazcano, V. *(Universidad Mayor)*

Evaluación Automatizada de Agentes de Centros de Contacto Usando Transformadores de Aprendizaje Profundo para Mejorar el Rendimiento y la Satisfacción del Cliente

Time: 10:20 – 10:35
Authors:

- Karmy, J. *(Universidad de Chile)*
- Vairetti, C. *(Universidad de Los Andes)*
- Maldonado, S. *(Universidad de Chile)*
- Mayer, I. *(Universidad de Los Andes)*

Lightweight Deep Learning Models for sEMG-based Hand Gesture Classification on Low-Resource Devices

Time: 10:40 – 10:55
Authors:

- Huentecura-Rodríguez, I. *(Universidad Mayor)*
- Cho, A. *(Universidad Mayor)*

Payment Compliance in a Dynamic Project Portfolio Through Progress-Based Forecasting: A Case Study

Time: 11:00 – 11:15
Authors:

- Riquelme-Gutiérrez, S. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Macuada, C. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Troncoso, P. *(Aguas Andinas)*
- Rojo-González, L. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Vásquez, Ó. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Balanced Depth Map Completion Based on Non-Local means and Infinity Laplacian

Vanel Lazcano

Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil en Computación e Informática
Universidad Mayor
Santiago, Chile
vanel.lazcano@umayor.cl

Abstract

Depth maps are essential information for computer vision applications, but most acquired depth maps lack sufficient information or holes, which must be addressed in some way. Therefore, generating new data to complete the missing information is a key task for these kinds of applications. In this work-in-progress, we present an approach to combine two models, namely, the infinity Laplacian and the Non-Local means. The Infinity Laplacian is the simplest interpolator that holds a set of axioms, and the NL-means is a very well-known filter that can be used for interpolation purposes. Using a weight map, we can strike a balance between the two. By means of the weight map, we balance between these two interpolation models in order to achieve better estimation of new data. Preliminarily, we present qualitative results on the KITTI Depth Completion Suite data set, showing that the combined model outperforms individual models.

Evaluación automatizada de agentes de centros de contacto usando transformadores de aprendizaje profundo para mejorar el rendimiento y la satisfacción del cliente

Juan Pablo Karmy, Carla Vairetti, Sebastián Maldonado, Ignacio Mayer

***Abstract*—Resumen Extendido**

***Index Terms*—Analítica de Negocios, Quality Management, Contact Center, Aprendizaje Profundo.**

EN la era digital actual, las empresas se enfrentan a una competencia intensa, y un entorno altamente dinámico [1], donde la interacción con los clientes se ha vuelto fundamental para el éxito empresarial [2]. Los centros de contacto (contact centers) son esenciales para establecer y mantener estas relaciones con los clientes. Sin embargo, la evaluación manual tradicional de las interacciones es un proceso lento, costoso y limitado, lo que puede dar lugar a errores y sesgos. Para abordar estas deficiencias, se propone la implementación de un sistema automatizado de puntuación de interacciones. La automatización ofrece ventajas significativas, como la eficiencia, la consistencia y la obtención de información en tiempo real, lo que permite a las empresas mejorar sus procesos y satisfacer las crecientes demandas del mercado.

Este proyecto tiene como objetivo principal crear un sistema de evaluación automática que utilice transformadores de aprendizaje profundo para medir el desempeño de los agentes en un centro de contacto. El propósito es proporcionar un análisis objetivo y exhaustivo del rendimiento en diversas tareas para mejorar el servicio y la satisfacción del cliente.

Propuesta Metodológica para la Gestión de Calidad Automática

La metodología central de este estudio implicó el desarrollo de un sistema de evaluación automática utilizando modelos de aprendizaje profundo basados en transformadores: BERT, ELECTRA y RoBERTa.

Se enfocó el análisis en la distribución de mensajes entre los agentes y la exploración de patrones en las interacciones. Las características seleccionadas para evaluar el rendimiento incluyeron:

- Detección de polaridad: Clasificación del sentimiento (positivo, negativo, neutral) en los diálogos del cliente y del agente para entender la satisfacción del cliente y posibles problemas.
- Identificación de ambigüedad (subjetividad): Distinción entre información objetiva y opiniones expresadas por los clientes para una toma de decisiones más efectiva y verificación de la claridad y precisión de los agentes.
- Reconocimiento de saludos y despedidas: Identificación de las fases de introducción y cierre en las conversaciones para analizar la estructura general y el flujo de las interacciones.
- Identificación de necesidades de los clientes: Reconocimiento de preguntas y preocupaciones de los clientes para personalizar las respuestas y lograr una mayor satisfacción.

Se crearon conjuntos de datos etiquetados manualmente para entrenar los modelos, aplicando técnicas de equilibrio para asegurar un rendimiento óptimo en cada tarea. El conjunto de datos de polaridad, por ejemplo, fue etiquetado manualmente para capturar matices del lenguaje chileno, incluyendo expresiones coloquiales con connotaciones negativas. Para el entrenamiento del modelo de polaridad, se utilizó un conjunto de 967,474 diálogos de 104,639 conversaciones entre febrero y noviembre de 2022, distribuidos en un 80% para entrenamiento y 20% para validación.

Resultados Clave

En promedio, todos los modelos de transformadores lograron superar el 94% de rendimiento en las cuatro tareas de evaluación de diálogos en el centro de contacto. Específicamente, el modelo RoBERTa destacó sobre los otros, mostrando los mejores resultados en todas las métricas evaluadas, incluyendo polaridad, subjetividad, identificación de necesidades y estructura de conversación. Este rendimiento superior se atribuye a su mayor conjunto de datos de preentrenamiento y a la tokenización Byte Pair Encoding (BPE), que mejora el manejo de palabras fuera del vocabulario [3].

Además, se evaluó la eficiencia del procesamiento del modelo RoBERTa en diferentes tipos de procesadores. En un procesador CPU, el tiempo promedio de inferencia fue entre 97.3 ms y 125.8 ms. En contraste, en una GPU T4 y V100, fue de 2.6 ms y 0.7 ms, respectivamente. La capacidad de etiquetado de conversaciones es significativamente mayor con GPU (81,632 conversaciones/hora con T4, 114,285 con-

J.P. Karmy y S. Maldonado: Department of Management Control and Information Systems, School of Economics and Business, University of Chile, Santiago, Chile. (e-mail: juanpablo@solutionsnow.cl,sebastianm@fen.uchile.cl).

C. Vairetti y I. Mayer: Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de Los Andes, Santiago, Chile. (e-mail: cvairetti@uandes.cl,itmayer@miuandes.cl).

C. Vairetti y S. Maldonado: Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI).

versaciones/hora con V100) en comparación con CPU (837 conversaciones/hora).

Para la evaluación de las conversaciones, se utilizó el modelo de ponderación (Weighted-Sum Model - WSM). Este modelo, basado en una rúbrica de evaluación de chat predefinida por la empresa , obtuvo un promedio de AQMScore del 57.5% para las conversaciones del primer semestre de 2023. La rúbrica incluye atributos como introducción, personalización, despedida, manejo de la atención, lenguaje, amabilidad, manejo de silencios, tiempo de respuesta y agilidad en la resolución.

Contribuciones Esperadas

La contribución de este estudio avanza en el campo de la evaluación automática en centros de contacto, proporcionando una metodología confiable y flexible para mejorar el rendimiento de los agentes y los procesos de toma de decisiones. La capacidad de evaluar automáticamente y analizar un gran número de conversaciones representa un avance significativo en la eficiencia y efectividad del centro de contacto. Esto optimiza la identificación de interacciones que requieren atención y mejora, permitiendo a los agentes de evaluación centrarse en las conversaciones ineficaces.

Conclusión y Trabajo Futuro

Los resultados de esta investigación son satisfactorios, demostrando la viabilidad de desarrollar un sistema de evaluación automática utilizando modelos de *deep learning* basados en transformadores, entrenados con una estructura de evaluación predefinida. Se confirmó que los modelos pueden entrenarse con alta precisión en el contexto de la gestión automática de la calidad y que pueden adaptarse a un marco de evaluación predeterminado por la empresa. La automatización de la evaluación de la calidad de las interacciones en los contact centers reduce significativamente el tiempo de investigación y permite analizar todas las interacciones producidas en un semestre, lo que representa un avance sustancial en el sector empresarial en comparación con la evaluación manual limitada. El modelo propuesto puede evaluar todas las conversaciones en menos de una hora, facilitando una toma de decisiones más rápida y la implementación de mejoras. La capacidad de los modelos para calificar automáticamente las conversaciones en tiempo real, con una velocidad excepcional de solo 3 milisegundos por evaluación, proporciona retroalimentación instantánea y la posibilidad de intervención inmediata, mejorando la calidad del servicio al cliente.

Como trabajo futuro, se recomienda expandir esta metodología para incluir el canal de voz. Esto implicaría el uso de modelos de *speech-to-text* para transcribir los diálogos hablados, que luego alimentarían el modelo de calificación automática. Es crucial crear un conjunto de datos específico para el contexto de la empresa, lo que permitiría a los modelos transcribir audio de manera más confiable y reconocer nombres de agentes, clientes y productos. También se sugiere explorar técnicas de entrenamiento semi-supervisado y considerar modelos como GAN+BERT , ya que requieren menos datos etiquetados y pueden generar métricas de manera automática y rápida, lo que conlleva una reducción de costos en términos de horas de trabajo. Estas propuestas tienen como objetivo enriquecer la funcionalidad del sistema y mejorar la calidad del servicio al cliente en los contact centers.

REFERENCES

[1] M. Okreglicka, K. Pichugina, “Selected elements of change management and business performance of microenterprises,” *Social and Economic Revue*, vol. 19(1), 2021.

[2] A. Srivastava, S. BarNir, “Customer-firm interaction and the small firm: Exploring individual, firm, and environmental level antecedents,” *Journal of Small Business Strategy*, vol. 26(2), pp. 23–50, 2016.

[3] Y. Liu, M. Ott, N. Goyal, J. Du, M. Joshi, D. Chen, O. Levy, M. Lewis, L. Zettlemoyer, and V. Stoyanov, “Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach,” 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1907.11692

Lightweight Deep Learning Models for sEMG-based Hand Gesture Classification on Low-Resource Devices

Israel Huentecura Rodríguez Anthony D. Cho
Escuela de Ingeniería, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Santiago, Chile
Email: israel.huentecura@mayor.cl, anthony.cho@umayor.cl

***Abstract*—Advanced myoelectric hand prostheses face significant real-world adoption challenges due to their unaffordable cost and high abandonment rates, often linked to control complexity and lack of functionality. This work, framed within the ProtoIA open-source project, addresses this issue by developing high-performance, computationally efficient neural network models for hand gesture classification from surface electromyography (sEMG) signals, specifically designed for low-resource hardware. Using the NinaPro DB1 dataset, we compare two literature-based models against four deep learning architecture customized by us. Our experimental results show that all proposed models achieve over 98% of accuracy. Notably, models like EMGHandNet-2D reached 99.78% of accuracy while meeting the strict size constraint of less than 1.5 MB for microcontroller deployment. This study concludes that lightweight deep learning architectures are a viable and powerful solution for prosthetic control on affordable hardware, and by releasing the code and pre-trained models, we provide a tangible contribution to the democratization of assistive technologies.**

***Index Terms*—sEMG, deep learning, hand gesture recognition, prosthetics, edge AI, embedded systems, lightweight models**

Payment Compliance in a Dynamic Project Portfolio Through Progress-Based Forecasting: A Case Study

Sol Riquelme-Gutiérrez[1], Claudio Macuada[1,2], Patricio Troncoso[2],
Luis Rojo-González[1,3,4,5,6], Óscar C. Vásquez[1,3]

[1]Department of Industrial Engineering, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile
[2]Aguas Andinas, Av. Presidente Balmaceda 1398, Santiago, Chile
[3]Program for the Development of Sustainable Production Systems (PDSPS),
Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile
[4]Département de Mathématiques et de Génie industriel, Polytechnique Montréal, Montréal, H3C 3A7, Quebec, Canada
[5]Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise,
la Logistique et le Transport (CIRRELT), Montréal, Canada
[6]Univ. Lille, Inria, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 CRIStAL, F-59000 Lille, France

***Abstract*—Budgeting is a key challenge for organizations managing dynamic behavior projects. One of the main difficulties lies in the discrepancy between planned and executed payments, which generates distortions in financial management and complicates strategic decision making. This paper presents a methodological framework consisting of two phases, prescriptive and predictive, by integrating survival analysis models with supervised learning approaches. Then we have an algorithm that allows us to simulate payout scenarios under different completion assumptions. This case study examines a Chilean sanitary organization, revealing a substantial correlation between project characteristics and payment delays based on historical data. Preliminary findings suggest that capital-intensive projects often prolong their timelines, adversely impacting the precision of yearly payment forecasts.**

***Index Terms*—Budget planning, Accruals estimation, Supervised learning, Dynamic project portfolio, Financial forecasting**

I. Introduction

Budget planning represents a persistent and complex challenge for institutions with a dynamic project portfolio. These organizations often operate with limited financial resources, tight budget cycles, and a high degree of uncertainty in project execution schedules [2]. One of the most critical difficulties arises from the mismatch between planned and actual payments, a difference that generates significant distortions and compromises strategic decision making [6]. These deviations, often caused by delays in project completion, impact the accuracy of financial statements and force institutions to make mid-year corrections that reduce operational efficiency [7]. In this context, improving the ability to forecast project payments, especially under uncertain conditions, has become essential to strengthen payment compliance throughout the year. Accurate accrual estimation is increasingly recognized as a cornerstone of financial reliability [5], and the literature has revealed a growing opportunity to improve forecasting models under uncertainty and dynamic project behavior [3]. This study aims to address the forecasting of monthly payments in the context of dynamic project portfolios by integrating prescriptive and predictive modeling techniques. The main objective is to develop a flexible, data-driven methodology to estimate future accruals based on the financial evolution and typology of the projects. In particular, the study focuses on generating accurate projections that anticipate deviations in financial planning, minimizing the need for reactive adjustments.

This research was partially funded by ANID, Beca Doctorado en el extranjero, Becas Chile, Folio 72220091.

II. Methods

The methodology followed consists of two phases. In the prescriptive phase the estimated duration will be determined, the Cox model developed by David Cox [1], and the Random Survival Forest (RSF) model developed by H Ishwaran, UB Kogalur, EH Blackstone, and MS Lauer [4] will be considered. Then, in the predictive phase, the estimated duration will be considered as an influential variable in regression models to estimate

the time between payments and the annual amount to be paid, to finally project the payments with scenario simulations.

The data sample used for this work comes from the company Aguas Andinas, which is composed of information payments of the company's historical projects. Data such as project ID, invoice date, amounts paid, and date of payment were considered. In addition, the project status is considered as a binary variable (it will take a value of 1 if the project is closed and a value of 0 if it is open), and the time is considered in the start-stop format for the Cox model with time-dependent variables. On the other hand, a sliding window cross-validation approach with a fixed cutoff in time is implemented. In each iteration, the model is trained with the projects completed up to a given cut-off date (e.g. August 2021) and the prediction is performed on the projects open on that same date and those starting during the following 24 months. This procedure is repeated for different cutoff dates, thus evaluating the robustness of the model over time.

Model selection is performed by comparing the predictive performance of the Cox model and the RSF model in terms of binary classification. The central hypothesis guiding this evaluation is the following: *Will this project remain open for the next 24 months?* From this formulation, the continuous output of the survival model (expected duration or probability of survival) is transformed into a binary prediction of project permanence.

The metrics used to assess performance focus on **sensitivity** or **recall**, defined as the proportion of projects actually opened that were correctly classified. Given the context of financial planning and resource prioritization, the most costly error is a 'false negative' (predicting that a project will close when it will actually remain open), which can lead to underestimating future commitments. Therefore, recall is prioritized as the central evaluation metric. In addition, complementary metrics such as specificity and overall accuracy are reported, allowing the overall balance of the models to be compared.

III. Results

This study is based on a current problem in Aguas Andinas, a sanitation company with a presence throughout Chile. Aguas Andinas finance department projects future monthly payments to suppliers and contractors based on the accrual of services. However, these projections are not approximate, which implies that the budget allocated for each year requires constants at the end of the year. Inaccuracy in payment forecasts has a direct impact on financial planning and efficient allocation of resources. In this sense, the annual budget deviation is estimated at 12% for the year 2023 and 7% for the year 2024, highlighting that payment had never before been controlled in the company, and the initiative to control it stems from the internal control of the company's main shareholder. As a result of this, the payment to suppliers has to be delayed and an agreement has to be reached to comply with it in subsequent months.

The database used includes information on 135 projects, which captures variables such as project start and completion dates, monthly financial progress, and total approved budgets. A descriptive analysis is performed. The results of the descriptive analysis of this research are based on a database of historical payments associated with projects. First, the number of active projects was evaluated in each area. This analysis led to the decision to limit the database for subsequent modeling exclusively to the distribution by two most representative areas (1 and 3). Finally, the variability in project duration within each area was explored which justifies their differentiated treatment in the subsequent analysis, shown in Figure 1.

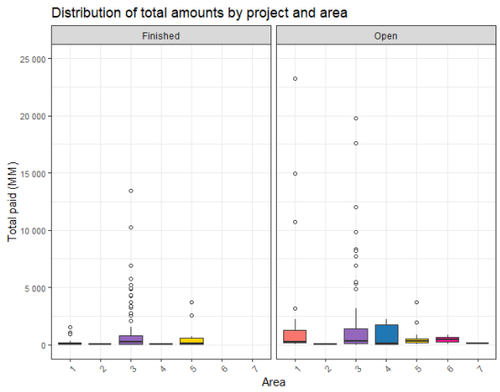


Fig. 1: Distribution of total payment by area.

To improve the predictive performance of the models, an iterative refinement process was applied, allowing the identification and removal of projects that negatively affected the model's accuracy. As a result, the Cox model reached a C-index of 0.804, showing a good ability to differentiate between projects that would close and those that would remain open. Financial progress had a strong and positive association with project completion ($\hat{\beta} = 5.89$, $p = 0.013$), while total cost showed a negative but weaker effect ($\hat{\beta} = -3.36 \times 10^{-4}$, $p < 0.001$), as shown in Table I.

TABLE I: Summary of C-index in Cox model and RSF model.

Model	Initial C-index	Final C-index	Improvement C-index	Eliminated Projects
Cox	0.123	0.804	0.681	15
RSF	0.828	0.970	0.142	13

In terms of classification, the Cox model achieved a sensitivity of 66.7% and a specificity of 81.8% using an optimal threshold, balancing both types of error. In contrast, the RSF model classified nearly all projects as likely to remain open in the next 24 months, maximizing the sensitivity (98%) and the specificity of 0.00%, with limited ability to detect actual closures. This trade-off reflects the focus on avoiding false negatives, which is especially relevant to anticipating future financial commitments.

IV. Conclusion

This study presents a methodological contribution to the problem of payment forecasting in dynamic project portfolios by integrating survival analysis and supervised learning in a decision support framework. The combination of historical behavioral modeling with real-time forecasting tools allows a nuanced understanding of the evolution of projects and their financial progress. The results show that the use of these models allows institutions to anticipate cash flows more accurately, especially in scenarios involving capital-intensive or long-duration projects. From a management perspective, the methodology offers a scalable solution to improve accrual estimation and align financial planning with operational reality. It also opens the door to dynamic scenario analysis and the generation of contingency plans under alternative execution assumptions. Future research will focus on incorporating uncertainty quantification using probabilistic models and validating its transferability to sectors other than infrastructure, such as sanitary, energy and education.

References

[1] D. R. Cox, "Regression models and life-tables," *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 34, no. 2, pp. 187–202, 1972.

[2] M. A. Dahana *et al.*, "Analysis of the budget planning process and budget execution process," *European Journal of Business and Management Research*, vol. 5, no. 4, 2020.

[3] S. Dhole *et al.*, "The joint information role of analysts cash flow and earnings forecasts," *Accounting & Finance*, vol. 61, no. 1, pp. 499–541, 2021.

[4] H. Ishwaran *et al.*, "Random survival forests," 2008.

[5] M. Mohd *et al.*, "Historical earnings, accrual accounting, and future cash flows: A malaysian perspective," *Economics*, vol. 9, no. 2, pp. 125–138, 2022.

[6] A. Musiega *et al.*, "Examining the influence of budget execution processes on the efficiency of county health systems in kenya," *Health policy and planning*, vol. 38, no. 3, pp. 351–362, 2023.

[7] G. P. Osebo, A. D. Debebe, and W. T. Eshetu, "Impact of budgeting process on organizational effectiveness: Evidence from wolaita zone selected woreda public finance sectors," *Journal of Economics and Sustainable Development*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2019.

Session N°10 – Track N°4

Operations Research Applications

Chair: Mauricio-Fuentealba, C. *(Universidad de Santiago de Chile)*
Place: X-103
Time: 10:00 – 11:15

Diseño de un Mapa Estratégico para una Comunidad Portuaria mediante un Enfoque Basado en Balanced Scorecard, DEMATEL y Optimización

Time: 10:00 – 10:15
Authors:

- Ascencio, L. *(Universidad de Los Andes)*
- González-Ramírez, R. *(Universidad de los Andes)*
- López-Ospina, H. *(Universidad de Los Andes)*
- González-Solano, F. *(Universidad del Norte)*
- Pérez-Retamales, J. *(Universidad de los Andes)*

Sobre el Diseño Óptimo para la Implementación de una Encuesta en Instituciones de Educación Superior

Time: 10:20 – 10:35
Authors:

- Acevedo-Meneses, D. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- González-Vivanco, L. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Herrera-Herrera, M. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Mauricio-Fuentealba, C. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Flanagan, A. *(Universidad de Valparaiso)*
- Dávila-Gálvez, S. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Vásquez, Ó. *(Universidad de Santiago de Chile)*

Hacia una Definición Común de Resiliencia en los Sistemas de Valorización de Residuos Alimentarios

Time: 10:40 – 10:55
Authors:

- Herrera-Herrera, M. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Espinoza-Pérez, A. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Mauricio-Fuentealba, C. *(Universidad de Santiago de Chile)*
- Serna, J. *(Université Paris-Saclay)*
- Bautista-Rodriguez, S. *(Universidad El Bosque)*

Diseño de un Mapa Estratégico para una comunidad portuaria mediante un enfoque basado en Balanced Scorecard, DEMATEL y optimización.

Luis M. Ascencio
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Chile Santiago, Chile
lascencio@miuandes.cl

Rosa G. González-Ramírez
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Chile Santiago, Chile
rgonzalez@uandes.cl

Héctor López-Ospina
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Chile Santiago, Chile
halopez@uandes.cl

Fernando R. González-Solano
Departamento de Productividad y Datos, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia
fernando.gonzalez69@uac.edu.co

Juan E. Pérez-Retamales
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Chile Santiago, Chile
jperez@uandes.cl

***Abstract*— Esta investigación propone el diseño de un Cuadro de Mando Integral (CMI) aplicado a la gestión estratégica de la interfaz marítima en una comunidad logística portuaria, utilizando el método DEMATEL jerarquizado, combinado con el uso de técnicas de optimización. El estudio aborda la necesidad de mejorar la eficiencia y efectividad de la cadena logística portuaria, considerando la interconexión de operaciones y la falta de herramientas analíticas para comprender las relaciones entre objetivos estratégicos de actores públicos y privados. Mediante un enfoque cuantitativo, se identifican actores clave, se definen objetivos estratégicos con indicadores de desempeño, y se construyen mapas estratégicos individuales y globales. Los resultados revelan relaciones causales críticas entre objetivos y actores, aportando insumos valiosos para la toma de decisiones colaborativas y la mejora continua en el entorno portuario como cadena de valor industrial.**

Keywords*— *strategy planning, strategic map, balanced scorecard, maritime port, port cluster, port community, DEMATEL, DEMATEL jerárquico.

I. Introduction

Esta investigación propone el diseño de un Cuadro de Mando Integral (CMI) aplicado a la gestión estratégica de la interfaz marítima en una comunidad logística portuaria, utilizando el método DEMATEL jerarquizado, combinado con el uso de técnicas de optimización. El estudio aborda la necesidad de mejorar la eficiencia y efectividad de la cadena logística portuaria, considerando la interconexión de operaciones y la necesidad de disponer de herramientas analíticas que facilite la comprensión de las relaciones entre objetivos estratégicos de los diversos actores públicos y privados que forman parte de la comunidad portuaria.

Esta investigación propone el diseño de un Cuadro de Mando Integral (CMI) aplicado a la gestión estratégica de la interfaz marítima en una comunidad logística portuaria, utilizando el método DEMATEL jerarquizado, combinado con el uso de técnicas de optimización. El estudio aborda la necesidad de mejorar la eficiencia y efectividad de la cadena logística portuaria, considerando la interconexión de operaciones y la necesidad de disponer de herramientas analíticas que facilite la comprensión de las relaciones entre objetivos estratégicos de los diversos actores públicos y privados que forman parte de la comunidad portuaria.

La metodología propuesta se basa en un enfoque cuantitativo. Como primera actividad se identifican actores clave, para posteriormente definir los objetivos estratégicos y sus indicadores de desempeño, y finalmente construir tanto los mapas estratégicos individuales como globales. Los resultados revelan relaciones causales críticas entre objetivos y actores, aportando insumos valiosos para la toma de decisiones colaborativas y la mejora continua en el entorno portuario como cadena de valor industrial.

II. Literatura

El marco teórico de este trabajo considera conceptos fundamentales de gestión estratégica, mapas estratégicos, Cuadro de Mando Integral (Kaplan & Norton), y el método DEMATEL. Por otra parte, el foco de análisis de este estudio es en las comunidades logísticas portuarias (CLP), como parte de las buenas prácticas de gobernanza portuaria [1], las cuales surgen como entidades formales diseñadas para gestionar las relaciones con las partes interesadas, fomentando la colaboración y creando consenso entre los actores del puerto [2].

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

Varios autores han estudiado la competitividad en puertos desde varias aristas, identificando los principales factores que inciden en la competitividad de un puerto, como la infraestructura, posición geográfica y otros elementos [3]. En particular, [4] proponen medir la competitividad portuaria a partir de la implementación de mejores prácticas, para lo cual proponen seis dimensiones que consideran elementos como sustentabilidad, la integración operacional de un puerto, calidad y eficiencia, y aspectos de digitalización y sistemas de información inter-organizacionales.

Sin embargo, tras una revisión extensa de la literatura en el ámbito de competitividad portuaria, [3] concluyen que existe una limitada evidencia empírica sobre los resultados derivados del diseño e implementación de estrategias de gestión portuaria. La carencia de una validación práctica y materialización de estudios en el ámbito de competitividad hacia la definición de estrategias de competitividad, restringe el valor de los estudios existentes para los tomadores de decisiones, quienes requieren herramientas más precisas y contrastadas para orientar sus políticas estratégicas.

Las comunidades portuarias son sistemas inter-organizacionales que requieren coordinación estratégica entre múltiples actores: terminales, navieras, aduanas, operadores logísticos, etc. El uso de mapas estratégicos basados en BSC permite alinear objetivos comunes y visualizar relaciones causa-efecto entre indicadores compartidos. Se destaca la importancia de integrar perspectivas financieras, de clientes, procesos internos y aprendizaje, junto con sostenibilidad.

Por otra parte, el método DEMATEL se presenta como una herramienta multicriterio que permite modelar relaciones causa-efecto entre objetivos estratégicos, y su versión jerarquizada permite analizar interacciones entre múltiples actores en sistemas complejos como el portuario. La propuesta de una metodología basada en DEMATEL jerárquico para determinar estrategias de competitividad en puertos, es una contribución que se presenta en este artículo y que contribuye a la brecha identificada en la literatura para avanzar en la literatura en competitividad portuaria hacia la definición de estrategias y recomendaciones que permitan a las comunidades portuarias mejorar su competitividad.

III. Metodogología

Los puertos por sus operaciones e infraestructura se pueden dividir en tres interfaces: marítima, portuaria y terrestre. Para este trabajo nos enfocamos únicamente en los procesos y actores asociados a la interfaz marítima de los puertos, para acotar el alcance de esta investigación, y pensar que futuros trabajos puedan extenderse al resto de interfaces.

La investigación propuesta en este trabajo sigue un enfoque cuantitativo estructurado en seis etapas que se plantean a continuación

a. Revisión teórica sobre CMI y DEMATEL.
b. Identificación de actores clave en la interfaz marítima: autoridad portuaria, navieras, operadores de terminal, agentes marítimos y autoridad marítima.
c. Definición de objetivos estratégicos y KPIs por cada actor de la interfaz marítima.
d. Aplicación de un instrumento DEMATEL individual a cada actor.
e. Construcción de mapas estratégicos individuales (de cada actor seleccionado).
f. Integración de resultados en un DEMATEL jerárquico para construir el mapa estratégico global de la comunidad portuaria organizada.

IV. Aplicación y Resultados

Se aplicó el instrumento DEMATEL a expertos representativos de cada actor de la interfaz marítima en puertos. Con los resultados de la aplicación de este cada actor, se generaron las matrices de relaciones directas y mapas estratégicos específicos. Posteriormente, se construyó una matriz jerarquizada que relaciona los objetivos entre actores, revelando influencias cruzadas y dependencias estratégicas. El mapa estratégico global muestra que los objetivos como "digitalización de procesos", "coordinación interinstitucional" y "sostenibilidad ambiental" actúan como factores causales que impactan en la eficiencia operativa y la satisfacción del cliente. Finalmente, los resultados fueron validados con expertos del sector portuario y logístico.

V. Conclusiones

La investigación demuestra que el uso combinado de CMI y DEMATEL jerárquico permite comprender y visualizar las relaciones estratégicas entre actores en la interfaz marítima. Se identifican objetivos clave que deben ser priorizados para mejorar la gestión colaborativa. El modelo propuesto ofrece una herramienta práctica para la toma de decisiones estratégicas en comunidades portuarias organizadas, promoviendo la alineación de estrategias y la eficiencia operativa. Además, contribuye con el estado del arte al proponer una metodología nueva en la literatura de competitividad portuaria, donde se ha hecho un esfuerzo importante en la identificación de dimensiones de competitividad, pero existe poco trabajo que elabore estrategias con un enfoque inter-organizacional.

Como trabajo futuro se propone extender el análisis para incorporar las otras interfaces del puerto. En particular, la interfaz terrestre es un ámbito donde los puertos enfrentan serios desafíos para la coordinación de camiones tanto en zona interportuaria como con el hinterland, por lo que avanzar en la definición de estrategias de competitividad sin duda será un aporte tanto científico como práctico.

Referencias

[1] M.D. Gracia, R.G. González-Ramírez, L.M. Ascencio, and J. Mar-Ortiz. "Assessing the implementation of governance best practices by Latin American ports". Maritime Economics & Logistics, 24(4), 806, 2022.

[2] Ministry of Transport and Telecommunications. Port logistics communities in Chile. http://comunidadeslogisticas.mtt.cl/. Accessed 1 Oct 2021.

[3] H. Yu, Y. Gong, and J. Liu. “A systematic literature review on port competitiveness”. International Journal of Logistics Research and Applications, 28(7), 720-744.

[4] L.M. Ascencio, P. Arroyo, and R.G. González-Ramírez. (2025). “From best practices to port competitiveness: An assessment of Latin America and Caribbean port logistics communities”. Case Studies on Transport Policy, 22, 101589.

Sobre el diseño óptimo para la implementación de una encuesta en instituciones de educación superior

Diego Acevedo
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
diego.acevedo.m@usach.cl

Lucia González-Vivanco
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
lucia.gonzalez.v@usach.cl

Melisa Herrera
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
melisa.herrera@usach.cl

Cristobal Mauricio
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
cristobal.mauricio@usach.cl

Andrea Flanagan
Departamento de Psicología
Universidad de Valparaiso
Valparaiso, Chile
andrea.flanagan@uv.cl

Sebastian Dávila-Gálvez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
sebastian.davila@usach.cl

Óscar C. Vásquez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
oscar.vasquez@usach.cl

***Abstract*—En este trabajo se aborda el problema de encuestar presencialmente a un conjunto de estudiantes que asisten a salas, horarios y días determinados para cursar las asignaturas definidas por su plan de estudio, minimizando las implicancias educativas producto de la aplicación en el aula. Para ello, se formula un modelo matemático. el cual es implementado considerando un caso de estudio basado en un institución de educación superior chilena. Se discuten los resultados obtenidos y trabajos futuros frente a posibles escenarios.**

***Index Terms*—Encuesta, Optimización Combinatoria, Institución de Educación Superior.**

I. Introducción

La implementación de encuestas a gran escala ha sido ampliamente estudiada desde diversas perspectivas metodológicas, con énfasis en la calidad del diseño, la cobertura poblacional y la asignación eficiente de recursos. El enfoque de [1] ha permitido identificar y cuantificar errores sistemáticos en cada etapa del proceso, desde el diseño hasta la implementación y análisis, destacando la importancia de planificar estratégicamente la recolección de datos. En contextos poblacionales extensos, estudios como [2] han abordado el desafío logístico de maximizar la representatividad con recursos limitados, integrando herramientas de optimización y muestreo adaptativo. Complementariamente, enfoques espaciales han sido utilizados para mejorar la cobertura en procesos de recolección de datos. Por ejemplo, [3] proponen esquemas de muestreo espacial óptimos en estudios ambientales, mientras que [4] desarrollan el software Distance para diseñar encuestas de muestreo por distancia, optimizando la ubicación de observadores. Por otra parte, [5] abordan la asignación de modalidades de contacto en encuestas a través de un modelo de optimización, cuyo objetivo principal es maximizar la calidad de los resultados bajo restricciones presupuestarias.

Este trabajo fue financiado parcialmente por ANID Chile a través el FONDECYT Regular 1250538, FONDECYT Iniciación 11251766 y FONDECYT Iniciación 11230855

En este trabajo se aborda el problema de encuestar presencialmente a un conjunto masivo de estudiantes que asisten a salas, módulos horarios y días determinados para cursar las asignaturas definidas por su plan de estudio, minimizando el efecto producto de la aplicación en el aula. Formalmente el problema se define a continuación.

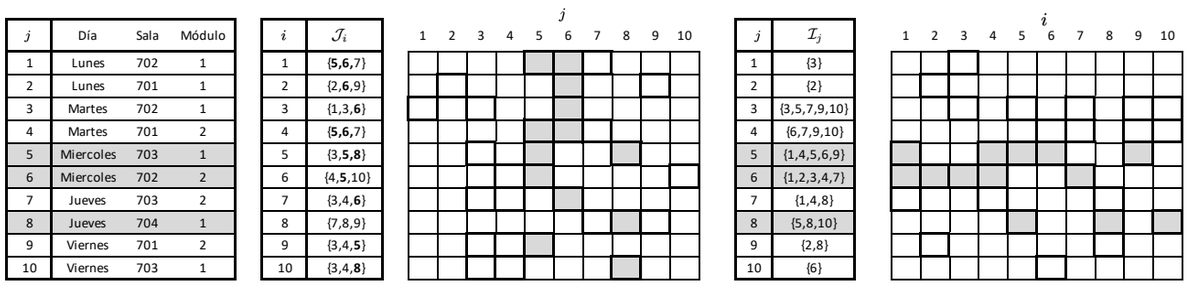
1) Definición del problema: Considere un conjunto de estudiantes $\mathcal{I}$ y un conjunto de bloques $\mathcal{J}$, donde cada bloque $j \in \mathcal{J}$ define una tripleta factible de sala-módulo horario-día. Cada estudiante $i \in \mathcal{I}$ tiene asignado un conjunto de bloques $\mathcal{J}_i \subseteq \mathcal{J}$ que definen su programa presencial de asignaturas a ser cursadas durante el semestre. Asimismo, cada bloque $j \in \mathcal{J}$ tiene asignado un subconjunto de estudiantes $\mathcal{I}_j \subseteq \mathcal{I}$

El problema consiste en encuestar a todo el conjunto de estudiantes $\mathcal{I}$ de manera presencial considerando la mínima cantidad de bloques $\mathcal{J}^* \subseteq \mathcal{J}$.

Figura 1 muestra una instancia del problema con su solución óptima.

II. Modelo Matemático

A continuación de presentan las variables, restricciones y función objetivo del modelo matemático propuesto



j	Día	Sala	Módulo
1	Lunes	702	1
2	Lunes	701	1
3	Martes	702	1
4	Martes	701	2
5	Miercoles	703	1
6	Miercoles	702	2
7	Jueves	703	2
8	Jueves	704	1
9	Viernes	701	2
10	Viernes	703	1

i	$\mathcal{J}_i$
1	{**5**,**6**,**7**}
2	{**2**,**6**,9}
3	{1,3,**6**}
4	{**5**,**6**,**7**}
5	{3,**5**,**8**}
6	{4,**5**,10}
7	{3,4,**6**}
8	{7,8,9}
9	{3,4,**5**}
10	{3,4,**8**}

j	$\mathcal{I}_j$
1	{3}
2	{2}
3	{3,5,7,9,10}
4	{6,7,9,10}
5	{1,4,5,6,9}
6	{1,2,3,4,7}
7	{1,4,8}
8	{5,8,10}
9	{2,8}
10	{6}

Fig. 1. La figura ilustra un ejemplo con un total de $|\mathcal{I}| = 10$ estudiantes y $|\mathcal{J}| = 10$ bloques, que representan un día, módulo horario y sala determinado tal como se ve en la tabla a la izquierda. La tabla central representa los bloques por cada estudiante, mientras la tabla a la derecha muestra los estudiantes en cada bloque. En ambos casos se ilustran los conjunto $\mathcal{J}_i$ y $\mathcal{I}_j$ para cada estudiante i y bloque j, respectivamente. Para visualizar la solución óptima del problema se remarca en gris los bloques seleccionados donde se aplicará la encuesta. El resultado muestra el subconjunto óptimo de bloques definido por $\mathcal{J}^* = \{5, 6, 8\}$. En la tabla central el número de bloque asignados en la solución óptima por cada estudiante i están destacados en negrita, mientras que en el resto de tablas se remarcan los bloques asignados en la solución óptima en color gris.

A. Variables

- La variable $x_{i,j} \in \{0, 1\}$ toma el valor 1 si el estudiante $i \in \mathcal{I}$ es encuestado en el bloque $j \in \mathcal{J}$; 0 en otro caso.
- La variable $y_j \in \{0, 1\}$ toma el valor 1 indica si se considera el bloque $j \in \mathcal{J}$ para implementar la encuesta 0 en otro caso.

B. Restricciones

$$\sum_{j \in \mathcal{J}_i} x_{i,j} \geq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I} \tag{1}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}_j} x_{i,j} \leq |\mathcal{I}_j| \cdot y_j \quad \forall j \in \mathcal{J} \tag{2}$$

$$x_{i,j}, y_j \in \{0, 1\} \tag{3}$$

El conjunto de restricciones (1) aseguran que para cada estudiante $i \in \mathcal{I}$ se asigne al menos uno de los bloques del conjunto $\mathcal{J}_i$ donde son realizadas las asignaturas de su programa curricular. El conjunto de restricciones (2) indica la realización de una encuesta en un bloque $j \in \mathcal{J}$ si existe al menos un estudiante $i \in \mathcal{I}_j$ asignado para ser encuestados en este. Finalmente, el conjunto de expresiones (3) define la naturaleza de las variables.

C. Función objetivo

$$[MIN] \sum_{j \in J} y_j \tag{4}$$

La expresión (4) representa la función objetivo la cual minimiza la cantidad de bloques utilizados para la aplicación de la encuesta.

D. Caso de estudio

Se considera el universo de estudiantes de una unidad académica de Ingeniería de un establecimiento universitario chileno. Inicialmente, se contó con un registro de 1.503 estudiantes. Sin embargo, tras un proceso riguroso de limpieza y depuración de los datos, el total fue $|\mathcal{I}| = 944$ estudiantes, distribuidos en 36 asignaturas.

La unidad académica posee 23 salas distribuidas físicamente en el campus universitario, considerando 6 días a la semana (de lunes a sábado) y 6 módulos horarios de clase por día (los módulos horarios comienzan a las 8:15 y terminan a las 18:15. Cada módulo tiene una duración de 1 hora con 20 minutos y separaciones entre módulos de 15 minutos, además de una ventana de timepo de 1 hora entre el módulo 3 y 4 para el almuerzo). De este modo, el número de bloques a considerar fue $|\mathcal{J}| = 23 \cdot 6 \cdot 6 = 828$.

E. Implementación

El modelo fue implementado en el lenguaje de programación Python versión 3.10.16 en un PC Intel(R) i5-9300H, con el solver GLPK versión 4.65.

III. Resultados

El tiempo de computo de la solución alcanzó los 131.74 segundos, llegando a la optimalidad. El resultado obtenido determina que la encuesta se aplicará en un total de bloques igual a $|\mathcal{J}^*| = 30$, con un máximo de 6 salas diferentes para el mismo día y módulo, tal como muestra la Tabla I, en donde se presenta un calendario por día y módulo horario, cuyos cuadrantes indican la sala y la cantidad de alumnos a ser encuestados en la misma. Se observa una mayor concentración en los días Lunes y Miércoles, y una baja concentración el día Sábado, que puede deberse a una menor cantidad de estudiantes y cursos presenciales definidos en este día.

IV. Discusión y Conclusiones

El modelo propuesto representa una aproximación eficiente para maximizar la cobertura de estudiantes durante la aplicación de encuestas, minimizando la cantidad total de asignaciones de bloques.

Sin embargo, es necesario reflexionar sobre ciertas limitaciones prácticas del modelo, particularmente relacionadas con la naturaleza estocástica del entorno universitario. En la práctica, diversos factores pueden afectar la ejecución efectiva

TABLE I
RESULTADOS DE ASIGNACIÓN DE ENCUESTAS POR BLOQUE

Módulo	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
1						
2	Sala 201: 29; Sala 202: 28; Sala 405: 7		Sala 424: 6	Sala 410: 5; Sala 424: 3	Sala 202: 13; Sala 405: 11; Sala 408: 5; Sala 409: 15; Sala 420: 14	
3	Sala 418: 7; Sala 425: 1	Sala 203: 24; Sala 422: 2; Sala 426: 2	Sala 201: 21; Sala 203: 24; Sala 401: 11; Sala 421: 8	Sala 406: 4	Sala 410: 2	Sala 421: 7
4	Sala 402: 6; Sala 404: 18; Sala 410: 17; Sala 421: 16; Sala 422: 22	Sala 404: 17; Sala 408: 15; Sala 409: 2; Sala 420: 17; Sala 422: 2	Sala 401: 17; Sala 410: 14; Sala 418: 15; Sala 423: 3	Sala 202: 16; Sala 420: 1	Sala 402: 28; Sala 411: 16	
5	Sala 202: 27; Sala 413: 2	Sala 201: 7; Sala 413: 2; Sala 424: 1	Sala 202: 21; Sala 203: 1		Sala 201: 10	
6	Sala 201: 11; Sala 422: 5; Sala 427: 3	Sala 201: 22; Sala 202: 7; Sala 406: 2; Sala 418: 5	Sala 201: 12; Sala 420: 6; Sala 421: 4	Sala 423: 3	Sala 202: 10; Sala 420: 8; Sala 421: 4; Sala 424: 3	Sala 202: 2; Sala 203: 2

de la solución propuesta. Por ejemplo, la asistencia estudiantil puede variar significativamente según la semana del semestre, dada la evaluaciones programadas en otras asignaturas y/o incluso por las dinámicas internas de cada curso. Asimismo, existen asignaturas con mayores tasas de asistencia que otras, lo que puede afectar la cobertura obtenida.

Además, es común que durante ciertos bloques se estén realizando evaluaciones (pruebas, controles u otros) que limitan la disponibilidad de los estudiantes para participar en encuestas, a pesar de estar programados en una sala en ese horario. Por tanto, aunque el modelo entrega una solución técnicamente óptima *ex ante*, su implementación requiere considerar estos aspectos contextuales para asegurar un resultado existoso *ex post*.

Como trabajo futuro, se sugiere la aplicación del modelo en estudios de caso específicos que permitan observar en terreno estas variaciones estocásticas y operacionales. Con base en dicha evidencia, podrían integrarse mejoras al modelo, tales como:

- Restricciones asociadas a la planificación de evaluaciones por parte del cuerpo docente.
- Porcentajes promedio de asistencia por asignatura, día y tipo de clase, extraídos de datos históricos.
- Un indicador de relevancia asociado a cada curso, basado en la asistencia promedio o en la naturaleza de la clase (cátedra, laboratorio, ayudantía, entre otros).
- Ajustes dinámicos que permitan reprogramar bloques de encuestas ante ausencias masivas o contingencias operativas.
- La disponibilidad de encuestadores, salas y horarios para la asignación, como también la cercanía entre bloques para el mismo encuestador.
- Flexibilizar la restricción de que los estudiantes deben ser encuestados, indicando un número mínimo.
- Controlar al cantidad de veces que un estudiante podría realizar la encuesta.

Incorporar estos elementos permitiría desarrollar un modelo robusto, flexible y alineado con los desafíos presentes en el contexto universitario.

REFERENCES

[1] P. P. Biemer, "Total survey error: Design, implementation, and evaluation," *Public opinion quarterly*, vol. 74, no. 5, pp. 817–848, 2010.

[2] K. Tanner, "Survey designs," *Research methods: Information, systems and contexts*, pp. 141–171, 2013.

[3] S. D. Zio, L. Fontanella, and L. Ippoliti, "Optimal spatial sampling schemes for environmental surveys," *Environmental and Ecological Statistics*, vol. 11, no. 4, pp. 397–414, 2004.

[4] L. Thomas, S. T. Buckland, E. A. Rexstad, J. L. Laake, S. Strindberg, S. L. Hedley, J. R. Bishop, T. A. Marques, and K. P. Burnham, "Distance software: design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size," *Journal of Applied Ecology*, vol. 47, no. 1, pp. 5–14, 2010.

[5] M. Calinescu, S. Bhulai, and B. Schouten, "Optimal resource allocation in survey designs," *European Journal of Operational Research*, vol. 226, no. 1, pp. 115–121, 2013.

Hacia una Definición Común de Resiliencia en los Sistemas de Valorización de Residuos Alimentarios

1st Melisa Joan Herrera Herrera
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
melisa.herrera@usach.cl

2nd Andrea Teresa Espinoza Perez
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
andrea.espinozap@usach.cl

3rd Cristobal Mauricio Fuentealba
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Santiago de Chile
Santiago, Chile
cristobal.mauricio@usach.cl

4th Juliana SERNA
Université Paris-Saclay, INRAE
AgroParisTech, UMR SayFood, F-91120
Palaiseau, France
juliana.serna-rodas@inrae.fr

5th Sandra Cecilia Bautista-Rodriguez
Dept. Industrial Engineering
Universidad El Bosque
Bogotá, Colombia
sbautistar@unbosque.edu.co

***Abstract*—La creciente urgencia por abordar el desperdicio alimentario ha impulsado el interés en los sistemas descentralizados de valorización como una vía para promover sistemas alimentarios sostenibles y resilientes. Estos sistemas permiten tratar los residuos localmente y ofrecen soluciones adaptables alineadas con los principios de la bioeconomía circular. Esta revisión explora cómo se define y operacionaliza la resiliencia en los sistemas descentralizados de valorización de residuos alimentarios. A partir de la literatura reciente, se analizan enfoques tecnológicos, ecológicos y organizacionales que contribuyen a estrategias resilientes dentro de una bioeconomía circular. La revisión destaca a los actores clave, las técnicas de valorización y los indicadores de sostenibilidad, identificando vacíos en los métodos de evaluación. Cabe destacar que, como resultado, se evidencia que no existe un consenso claro sobre el concepto mismo de resiliencia, lo que limita su aplicación práctica y medición sistemática.**

***Index Terms*—Bioeconomía; Economía Circular; Residuos Alimentarios; Valorización de Residuos.**

REFERENCES

Agradecimiento a Vicerrectoría de Postgrado USACH y DICYT-062517EP_POSTDOC_AYUDANTE

Index of Authors

Aburto-Lafourcade, L. – 38, 147, 181
Acevedo-Meneses, D. – 59, 97
Acosta-Espejo, L. – 125
Agüero-Tobar, M. – 29
Aguirre-Lopez, M. – 114
Aguirre, B. – 24
Ahmed, A. – 74
Alarcón-Salvo, I. – 101
Albornoz, V. – 61, 67
Alcota, M. – 137, 150
Aliaga, S. – 52
Alves-Junior, P. – 191
Angulo-Meza, L. – 36, 125
Angulo, A. – 132, 137, 150
Arancibia-Hernández, F. – 101
Arancibia-Rodríguez, C. – 45
Araya, J. – 123
Arnosti, N. – 33
Ascencio, L. – 161
Askenasy, R. – 69
Astudillo, M. – 156
Avanzini, E. – 2, 48, 145

Barría-Fuentes, I. – 94
Barrientos, B. – 141
Barrientos, N. – 124
Basso, F. – 2, 7, 92, 184, 185
Bautista-Rodriguez, S. – 109
Becerra Muñoz, P. – 118
Benítez-Gómez, A. – 40
Bernal, P. – 144
Berríos-Soto, K. – 115
Blázquez, C. – 43, 60, 175
Böhm-Ghiringhelli, A. – 73
Borodin, V. – 126
Boyardi-Alache, N. – 132
Brotcorne, L. – 157
Brunaud, B. – 48
Bucarey-López, V. – 181
Burgos, M. – 123
Bustos-Romero, A. – 90

Cabrera-Guerrero, G. – 79, 96, 131, 143, 166
Camacho-Vallejo, J. – 114, 151, 160
Campos, D. – 104
Campuzano, G. – 30
Cancela, H. – 70
Candia-Véjar, A. – 107
Cannella, S. – 112
Cárcamo-Vallejos, N. – 139
Cardozo, R. – 141
Carrasco-Schmidt, R. – 69
Carrasco, M. – 28, 123
Carrasco, R. – 10, 142
Castro, M. – 69
Catalán, A. – 10
Cataldo, A. – 133
Celedon, J. – 99
Cerda, D. – 137, 150
Černý, M. – 13
Cho, A. – 54, 69, 71, 83
Cid-Garcia, N. – 105
Cisternas, P. – 94
Cleveland, P. – 12
Contreras-Bolton, C. – 75, 89, 90
Contreras, I. – 181
Contreras, J. – 92, 178
Cortés-Carrillo, C. – 115, 138
Covarrubia, J. – 7

Da Silva-Ovando, A. – 165
Dávila-Gálvez, S. – 26, 32, 81, 97, 157
Dávila-Soria, D. – 114
de Athayde-Prata, B. – 91
Derakhti, A. – 160, 179
Díaz, V. – 51
Dolgui, A. – 126
Duran-Mateluna, C. – 126

El-Hajj, H. – 74
Erices-Vera, J. – 89
Escalona, P. – 132, 137, 148, 150, 156, 157
Escobar-Mieres, D. – 47
Espinoza M. – 123
Espinoza-Pérez, A. – 59, 109, 139

Favereau, M. – 27, 173
Flanagan, A. – 97
Flores-Muñíz, J. – 114
Flórez-Calderón, L. – 60
Fredes, M. – 32
Fuentes, F. – 7

Gaete-Sandoval, C. – 35
Galaz, P. – 51
Galleguillos, S. – 155
Garmendia, M. – 113
Gatica, G. – 22, 106, 124
Geyter, M. – 182
Gicquel, C. – 102
Goic, M. – 86
Gómez-Lagos, J. – 107, 125
Gómez-Navarro, M. – 106
Gómez-Rocha, J. – 151
Góngora-Leiva, C. – 47
González-Araya, M. – 29, 36, 125
González-Gallardo, S. – 131
González-Marín, M. – 53
González-Ramírez, R. – 29, 31, 57, 154, 160, 161
González-Solano, F. – 161
González-Vivanco, L. – 97
González, V. – 181
Gutiérrez-Jarpa, G. – 15, 17, 30, 35, 40, 43, 45, 47, 122
Gutiérrez-Padilla, M. – 159
Guzmán, J. – 113

Hashemkhani-Zolfani, S. – 130
Hernández, C. – 131
Herrera-Herrera, M. – 97, 109
Herrera-León, S. – 144
Herrera-Rivera, S. – 40
Hladík, M. – 6
Homem-de-Mello, T. – 16
Huentecura-Rodríguez, I. – 83
Huerta-Muñoz, D. – 68, 154

Ibarra-Rojas, O. – 154
Ilabaca, A. – 127
Inostroza-Leon, M. – 117, 136
Ivorra, B. – 28

Jacobo-Romero, Y. – 154
Jara-Moroni, P. – 81
Jara, F. – 16
Jara, R. – 46
Jiménez, D. – 54, 58, 71

Karmy, J. – 77

Kauer, D. – 24
Kedad-Sidhoum, S. – 102
Klapp, M. – 4, 65
Komasi, H. – 169

Lagos-González, F. – 181
Lagos, D. – 104
Lagos, G. – 16
Laroze, D. – 162
Larraín-Benavides, F. – 147
Larraín, H. – 4, 65, 182
Latorre-Núñez, G. – 21, 37
Lazcano, V. – 54, 71, 76
Ledezma-Pizarro, B. – 60
Leger, P. – 103
Leonario-Marambio, M. – 119
Lillo-Quintana, C. – 47
Linfati, R. – 9, 20, 21, 106, 124
Lizama, C. – 16
Loaiza, D. – 86
López-Ospina, H. – 31, 161
López, J. – 28
López, M. – 141
Lozano, F. – 133
Lüer-Villagra, A. – 92, 93, 94, 105, 111, 134, 140
Luna, R. – 69

Mac-Cawley, A. – 67, 69
Macera, R. – 52
Macuada, C. – 85
Maldonado, S. – 46, 49, 52, 55, 77
Marechal, M. – 28
Marianov, V. – 93
Marín Vélez, V. – 118
Marín, A. – 24
Marquez-Heredia, D. – 82
Martínez-Fantini, L. – 82
Martínez-Godoy, I. – 136
Massé-Palermo, M. – 34
Maturana-Ross, J. – 108
Mauricio-Fuentealba, C. – 97, 109
Mayer, I. – 77
Medalla, M. – 26
Medina-Vergara, A. – 35
Mena-Reyes, J. – 9
Méndez-Vogel, G. – 81, 93
Mendoza-Burgos, S. – 43
Mendoza-Casseres, D. – 84, 88
Mendoza-Hernandez, M. – 88
Mercado-Cabarcas, M. – 84
Mercado-Morales, Y. – 31
Miranda-González, P. – 30, 60, 78, 112, 122, 144
Miranda-Torres, R. – 53
Miranda, C. – 12
Miranda, M. – 71
Mitchell-González, F. – 17, 35
Monardes-Concha, C. – 2, 145, 155
Mondschein-Prieto, S. – 24, 62, 101, 113
Montecinos, J. – 127
Montenegro-Dos Santos, F. – 130
Mora-Quijada, C. – 148
Morandé, J. – 170
Moreno, V. – 175
Morillo-Torres, D. – 21, 22, 106, 124, 159
Moyano, G. – 71
Moyano, M. – 79, 96, 131, 143, 166
Muñoz-Bustos, S. – 143
Muñoz-Herrera, S. – 5, 57
Muñoz-Pincheira, J. – 171
Muñoz, F. – 18
Muñoz, P. – 155

Nicolis, O. – 58

Obreque, C. – 30
Ojeda-Ortega, N. – 79, 131
Olivares-Alvarez, L. – 79, 112
Olivares-Benitez, E. – 78, 134
Olivares, A. – 103
Olivares, M. – 25
Olivera-Roja, F. – 187
Olmedo, J. – 124
Orejuela-Cabrera, J. – 164
Ortiz-Araya, V. – 9, 17
Ortiz-Moreno, F. – 17
Osorio-Gómez, J. – 164
Oyanedel-Garcés, B. – 43

Pagnoncelli, B. – 102
Palacios-Díaz, N. – 106
Palk, M. – 188
Palma, C. – 5
Palma, O. – 67
Palominos, P. – 99
Parada, V. – 75, 87
Paredes-Belmar, G. – 15, 30, 35, 40, 43, 45, 47, 127, 159
Paredes-Rodríguez, A. – 164
Peralta-González, J. – 78, 134, 136
Pérez-Retamales, J. – 161
Pérez-Rojas, K. – 36, 80
Perotti, S. – 7
Peso, B. – 108
Pezoa, R. – 2, 7, 92, 184, 185
Pina-Pardo, J. – 170
Pinto-Rojas, I. – 47
Pizarro, D. – 51
Plà-Aragonés, L. – 67
Plaza-Vega, F. – 58
Poblete, R. – 103
Porras-Lobos, S. – 45
Pradenas, L. – 87
Prías-García, J. – 22
Pulfer, JC. – 40

Queirolo, J. – 46
Quelopana, A. – 119
Quezada, F. – 26, 32, 102
Quezada, L. – 99
Quiliche-López, A. – 111
Quilodrán-Torres, P. – 185
Quintana, P. – 70
Quintero-Reyes, J. – 80

Ramírez-Correa, P. – 169
Ramos, A. – 28
Rampasso, I. – 117
Recalde-Ramírez, J. – 141
Regis-Hernández, F. – 82
Reinecke, C. – 104
Rey, C. – 75
Rey, P. – 115, 133, 138
Reyes-Reyes, N. – 125
Riffo-Carrasco, R. – 145
Ríos-Mercado, R. – 68
Ríos-Solís, Y. – 82, 105
Ríos, S. – 12
Riquelme-Gutiérrez, S. – 85
Rivillo-Carreño, J. – 43
Roa, J. – 46

Roda, I. – 117
Rojas-Castillo, V. – 145
Rojas-Espinoza, B. – 4, 65, 107
Rojo-González, L. – 85
Romero-Ayala, O. – 122
Romero-Silva, C. – 147
Rubio-Carrasco, T. – 181
Ruz, G. – 10, 69
Ryzák, D. – 13

Saavedra-Ormazábal, P. – 38
Saavedra-Valenzuela, M. – 101
Saavedra, V. – 80
Salazar-Gómez, R. – 140
Salazar-Treviño, E. – 68, 151
Salcedo-Sepúlveda, L. – 22
Saldívar, T. – 141
Salomon, V. – 99
Salussolia, G. – 54
San Martín-González, D. – 142
San-Martín-Durán, J. – 37
Sanchez-Meneces, W. – 165
Sánchez, C. – 49, 133
Sandoval-Mondaca, M. – 138
Santibañez-González, E. – 179
Sauré, A. – 133
Sauré, D. – 86, 168
Schulte, F. – 190
Schwartz, D. – 25
Sepulveda-Hernández, E. – 53
Serna, J. – 109
Shams-Eddin, M. – 74
Silva-Muñoz, M. – 75
Silva, D. – 170
Simon, F. – 33
Slater-Menanteau, K. – 53
Smith, A. – 170
Solar-Carvajal, J. – 45
Solar, F. – 168
Soto-Concha, R. – 9, 21
Stuck, T. – 69
Subiabre, F. – 62
Suchan, K. – 31, 57

Tabilo-Álvarez, J. – 187
Tan, F. – 169
Tapia-Jaque, N. – 184
Tapia-Ubeda, F. – 78, 112, 117, 118, 134, 136, 187
Tapia, K. – 155
Tello-Valenzuela, G. – 96
Thevenin, S. – 126
Thraves, C. – 8
Tobon-Castro, L. – 166
Toledo, A. – 2
Tomanová, P. – 44
Torrealba-González, P. – 15
Trenti, E. – 34
Troncoso-Espinosa, F. – 20, 37
Troncoso, P. – 85

Urbán-Rivero, L. – 41
Utreras-Cifuentes, C. – 162

Vairetti, C. – 46, 49, 52, 55, 77
Valdebenito-Ferrando, C. – 17
Valenzuela-Núñez, C. – 20, 37
Valenzuela-Riquelme, V. – 27
Varas-Concha, F. – 80
Varas, M. – 2, 92, 184, 185
Varela-Bastías, S. – 17
Vargas, M. – 99
Vásquez, Ó. – 85, 91, 97, 162
Vega-Hidalgo, M. – 87
Vega, M. – 5
Velasco-Álvarez, J. – 41
Vélez-Gallego, M. – 170
Vera-Andreo, J. – 73, 182
Vera-Carrasco, C. – 5
Verdejo-Varas, N. – 35
Vergara, F. – 9
Viana-Céspedes, V. – 135
Vicencio-Medina, S. – 82, 105
Vidal, I. – 8
Vilches-Carrillo, V. – 23
Villanueva, C. – 61
Voß, S. – 108, 188
Vulcano, G. – 8

Weber, R. – 46
Wickert, T. – 138
Willmer-Escobar, J. – 9, 159

Yang, H. – 48
Yankovic, N. – 62

Zambrano-Suárez, J. – 23
Zamorano, J. – 81
Zumaeta, C. – 55

Organized by

ICHIO
INSTITUTO CHILENO DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA

Universidad Católica del Norte

Collaborators

Universidad de los Andes

Sponsors

hexaly

IFORS
INTERNATIONAL FEDERATION OF OPERATIONAL RESEARCH SOCIETIES

AMPL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN
VIÑA CONCHA Y TORO

CCU

LOS PELAMBRES
ANTOFAGASTA MINERALS

Santander

XV Chilean Conference on Operations Research
OPTIMA 2025
https://optima2025.ichio.cl