



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS GEOLÓGICAS
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN DE ARRASTRES O/A EN ETAPA DE
EXTRACCION DE UNA PLANTA SX**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención
en Metalurgia

FELIPE ANDRÉ SAGREDO GÓMEZ

Profesor guía: Dr. Oscar Benavente Poblete

Antofagasta, 16 de Diciembre, 2011

DEDICATORIA

Se lo dedico a mis padres Gisela y Carlos; a mis hermanos Gisela Andrea y Caco, que siempre han estado a mi lado, por su incondicional apoyo y aliento,.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco en primer lugar a mis padres, por el apoyo que siempre me han brindado en todos los proyectos que he iniciado, además, por el gran esfuerzo realizado de darme a mí y mis hermanos la oportunidad de ser profesionales.

A los muchachos de los laboratorios de Metalurgia, Víctor, Larry, Tania, Andrea, Luis, Nelson, Evelyn y Nannette, por todo el apoyo que me otorgaron durante mi trabajo.

A Ricardo Carvajal y Luis Madrid que fueron claves para poder culminar este trabajo.

A mi tutor Oscar Benavente que siempre me respaldó y alentó en cada una de las decisiones que tomé durante todos los trabajos que desarrollamos.

A mis dos grandes amigos Camilo y Raúl que han estado en las buenas y en las malas conmigo, este título también es para ustedes.

Finalmente, a Basf por el financiamiento y apoyo técnico, al CICITEM y Universidad Católica del Norte por facilitar los equipos para las pruebas.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. Antecedentes generales	22
1.2. Objetivos	23
1.2.1 Objetivo general	23
1.2.2 Objetivos específicos	23
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS	24
2.1. Extracción por solventes	24
2.2. Reactivo orgánico	26
2.2.1. Clases de extractantes.....	27
2.2.1.1. Esteres	27
2.2.1.2. Ácidos carboxílicos.....	27
2.2.1.3. Oximas	28
2.2.2. Mecanismo	31
2.2.2.1. Solvatación /par iónico	31
2.2.2.2. Intercambio iónico	31
2.2.2.3. Quelación.....	32
2.2.3. Diluyente	32
2.3. Emulsión	33
2.3.1. Composición de la emulsión.....	33
2.3.2. Tensión interfacial	34
2.3.3. Interacción molecular.....	35
2.4. Arrastre de orgánico en la fase acuosa	38
2.4.1 Banda de dispersión	39
2.4.2 Coalescencia y rotura de gota	41
2.4.2.1. Efecto del tipo, localización y velocidad del agitador en el tamaño de gota	42
2.4.2.2. Efecto de la viscosidad en el tamaño de gota.....	45
2.4.2.3. Efecto del pH en el tamaño de gota	47
2.4.2.4. Efecto de la temperatura en el tamaño de gota.....	49

2.5.	Métodos multivariable	51
2.5.1	Métodos dependientes	51
2.5.2	Métodos independientes	52
2.6.	Diseño de experimento	53
2.6.1.	Diseño factorial	54
2.6.1.1.	Modelo de medias	55
2.6.1.2.	Modelo de regresión.....	55
2.6.2.	Implementación del modelo	56
2.6.2.1.	Planteamiento de hipótesis	56
2.6.2.2.	Comprobación de las hipótesis mediante el análisis de los residuos	57
2.7.	Análisis de varianza (ANOVA)	59
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	62
3.1.	Preparación del PLS y orgánico	62
3.1.1.	PLS	62
3.1.2.	Orgánico	63
3.2.	Caracterización de las soluciones orgánicas y acuosa.....	64
3.2.1.	Densidad.....	64
3.2.2.	Viscosidad.....	66
3.2.3.	Tensión interfacial	68
3.3.	Parámetros operacionales para las pruebas	70
3.3.1.	Celda piloto de extracción.....	70
3.3.2.	Reactor con control de agitación y temperatura	71
3.4.	Procedimientos para las pruebas	71
3.4.1.	Celda de extracción	71
3.4.2.	Reactor con control de agitación y temperatura	73
3.5.	Diseño de experimento	76
3.5.1.	Diseño factorial 2^k para las pruebas.....	76
3.6.	Características de celda piloto de extracción.....	78
3.7.	Análisis de arrastre de orgánico en acuoso.....	79

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	82
4.1. Resultados de las caracterizaciones	82
4.2.1. Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad	82
4.2.2. Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad	85
4.2.3. Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial a pH 1,6 y pH 2,0	88
4.2.4. Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial a 10°C y 20°C	92
4.2.5. Efecto de la temperatura en el tiempo de separación de fase a 500 rpm	96
4.2.6. Efecto de la temperatura en el tiempo de separación de fase a 700 rpm	98
4.2.7. Efecto de la agitación en el tiempo de separación de fase a 10°C	100
4.2.8. Efecto de la agitación en el tiempo de separación de fase a 20°C	102
4.2. Resultados de arrastres O/A.....	104
4.2.1. Efecto de la temperatura en los arrastres O/A	104
4.2.2. Efecto de la agitación en los arrastres O/A	108
4.2.3. Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente.....	112
4.2.4. Efecto del sistema de muestreo en el nivel de arrastre O/A.....	114
4.3. Resultados de ANOVA	117
4.3.1. Efecto de la concentración de extractante en el arrastre O/A.....	117
4.3.2. Efecto del tipo de oxima en el arrastre O/A.....	123
4.4. Análisis factorial.....	124
4.4.1. Efecto de la agitación, pH y temperatura en la cetoxima.	124
4.4.2. Efecto de la agitación, pH y temperatura en la mezcla.	126
4.4.3. Efecto de la agitación, pH y temperatura en la aldoxima.	127
4.5. Modelación estadística de arrastres O/A	130
4.5.1. Planteamiento de la hipótesis	130
4.5.2. Ecuación del modelo de medias para los reactivos.....	131
Ecuación para el reactivo Lix 8180.....	131
Ecuación para el reactivo Lix 84 I.....	131
Ecuación para el reactivo Lix 9790 N	132
Ecuación para el reactivo Lix 984 N	132
Ecuación para el reactivo Lix 860 NI	132

Ecuación para el reactivo Lix 860 I	133
Ecuación para el reactivo Acorga 5640	133
Ecuación para el reactivo Lix 612 NLV	133
4.5.3. Graficas de los residuos.....	135
5. CONCLUSIONES	141
6. RECOMENDACIONES.....	142
7. BIBLIOGRAFÍA	143
ANEXO A.....	147
Anexo A.1: Tabla de densidad y viscosidad a 10°C	148
Anexo A.2: Tabla de densidad y viscosidad a 20°C	149
ANEXO B	150
Anexo B.1: Tensión interfacial al 10% de extractante	151
Anexo B.2: Tensión interfacial al 15% de extractante	152
Anexo B.3: Tensión interfacial al 20% de extractante	153
ANEXO C	154
Anexo C.1: Tiempo de separación de fases a 10°C	155
Anexo C.2: Tiempo de separación de fase a 20°C.....	156
ANEXO D.....	157
Anexo D.1: Tabla de arrastre O/A a distintos pH.....	158
Anexo D.2: Tabla de arrastre O/A a distintas temperaturas y agitación	160
ANEXO E	164
Anexo E.1: Tiempo medio de separación de fase a 10°C.....	165
Anexo E.2: Tiempo medio de separación de fase a 20°C.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de circuito LIX-SX-EW (Gutierrez.,2001)	26
Figura 2: Estructura química del Versatic-10 (Algret et al., 1988).....	28
Figura 3: Clasificación de las hidroxi-oximas (Handbook.,2007).....	29
Figura 4: Estructura química hidroxi-oxima (MCT Redbook.,1998).....	29
Figura 5: Sistema acuoso / diluyente (Handbook.,2007)	37
Figura 6: Sistema acuoso / orgánico (Handbook.,2007).....	38
Figura 7: Relación banda de dispersión y arrastre (Gutierrez.,2001).....	40
Figura 8: Arrastre O/A a distintas continuidades (SX Kinetics.,2007).....	41
Figura 9: Esquema del aspa de disco (Stamatoudis et al.,2005).....	43
Figura 10: Tiempo de separación de las fases vs velocidad de agitación (Semiat et al.,1995)..	44
Figura 11: Efecto de la agitación en la distribución de tamaño de las gotas (Ruiz et al.,2002)..	45
Figura 12: Esquema del efecto de la viscosidad en la coalescencia (Denkov et al.,2007)	46
Figura 13: Efecto de la concentración de extractante en la distribución de tamaño de gotas (Ruiz et al.,2002).....	47
Figura 14: Sistema agua - tolueno, 10% dispersa en la fase a 400 rpm (Kraume et al.,2006)...	48
Figura 15: Efecto del pH en la distribución de tamaño de gotas (Ruiz et al.,2002).....	49
Figura 16: Efecto de la temperatura en la distribución de tamaño de gotas (Ruiz et al.,2002) ..	50
Figura 17: Ejemplo de gráficos de residuos (Minitab.,2007)	58
Figura 18: Ejemplo de un análisis ANOVA (Minitab.,2007).....	61
Figura 19: Bidones de almacenamiento de PLS	63
Figura 20: Bidones de almacenamiento de orgánico.....	64
Figura 21: Medición de densidad.....	66
Figura 22: Medición de viscosidad.....	66
Figura 23: Tensiómetro de Dunouy	68
Figura 24: Aspa del agitador en celda de extracción.....	72
Figura 25: Probeta para medir continuidad y razón O/A.....	73
Figura 26: Esquema reactor con control de temperatura.....	74
Figura 27: Pipeta para toma de muestra desde reactor.....	75
Figura 28: Jeringa adherida a la pipeta para toma de muestra desde reactor.....	76
Figura 29: Bombas de la celda de extracción	79
Figura 30: Frasco para almacenar las muestras	79
Figura 31: Agitación de refino con solvente	80

Figura 32: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad de las aldoximas.....	82
Figura 33: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad de las cetoximas.....	83
Figura 34: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad de las mezclas	84
Figura 35: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad de las aldoximas.....	85
Figura 36: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad de las cetoximas.....	86
Figura 37: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad de las mezclas	87
Figura 38: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las aldoximas a pH 1,6	88
Figura 39: Efecto la de concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las aldoximas a pH 2,0	88
Figura 40: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial en las cetoximas a pH 1,6	89
Figura 41: Efecto la de concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las cetoxima a pH 2,0.....	89
Figura 42: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las mezclas a pH 1,6.....	90
Figura 43: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las mezclas a pH 2,0.....	90
Figura 44: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las aldoximas a 10°C.....	92
Figura 45: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las aldoximas a 20°C.....	92
Figura 46: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las cetoxima a 10°C.....	93
Figura 47: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las cetoximas a 20°C.....	93
Figura 48: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las mezclas a 10°C.....	94

Figura 49: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las mezclas a 20°C.....	94
Figura 50: Efecto de la temperatura en el TSF al 10% de extractante a 500 rpm	97
Figura 51: Efecto de la temperatura en el TSF al 15% de extractante a 500 rpm	97
Figura 52: Efecto de la temperatura en el TSF al 20% de extractante a 500 rpm	97
Figura 53: Efecto de la temperatura en el TSF al 10% de extractante a 700 rpm	99
Figura 54: Efecto de la temperatura en el TSF al 15% de extractante a 700 rpm	99
Figura 55: Efecto de la temperatura en el TSF al 20% de extractante a 700 rpm	99
Figura 56: Efecto de la agitación en el TSF al 10% de extractante a 10°C	101
Figura 57: Efecto de la agitación en el TSF al 15% de extractante a 10°C	101
Figura 58: Efecto de la agitación en el TSF al 20% de extractante a 10°C	101
Figura 59: Efecto de la agitación en el TSF al 10% de extractante a 20°C	103
Figura 60: Efecto de la agitación en el TSF al 15% de extractante a 20°C	103
Figura 61: Efecto de la agitación en el TSF al 20% de extractante a 20°C	103
Figura 62: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 500 rpm y al 10% de extractante.	106
Figura 63: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 700 rpm y al 10% de extractante.	106
Figura 64: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 500 rpm y al 15% de extractante.	106
Figura 65: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 700 rpm y al 15% de extractante.	107
Figura 66: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 500 rpm y al 20% de extractante.	107
Figura 67: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 700 rpm y al 20% de extractante.	107
Figura 68: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 10°C y 10% extractante	110
Figura 69: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 20°C y 10% de extractante	110
Figura 70: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 10°C y 15% extractante	110
Figura 71: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 20°C y 15% de extractante	111
Figura 72: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 10°C y 20% de extractante	111
Figura 73: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 20°C y 20% de extractante	111
Figura 74: Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente y 10% de extractante	113
Figura 75: Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente y 15% de extractante	113
Figura 76: Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente y 20% de extractante	113
Figura 77: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 1,6 y 10% de extractante	115
Figura 78: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 1,6 y 15% de extractante	115
Figura 79: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 1,6 y 20% de extractante	115

Figura 80: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 2,0 y 10% de extractante	116
Figura 81: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 2,0 y 15% de extractante	116
Figura 82: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 2,0 y 20% de extractante	116
Figura 83: Análisis ANOVA del reactivo Lix 8180.....	117
Figura 84: Análisis ANOVA del reactivo Lix 84 I.....	118
Figura 85: Análisis ANOVA del reactivo Lix 9790 N	119
Figura 86: Análisis ANOVA del reactivo Lix 984 N	119
Figura 87: Análisis ANOVA del reactivo Lix 860 NI	120
Figura 88: Análisis ANOVA del reactivo Acorga 5640	121
Figura 89: Análisis ANOVA del reactivo Lix 860 I.....	121
Figura 90: Análisis ANOVA del reactivo Lix 612 NLV	122
Figura 91: Análisis ANOVA de la oxima del orgánico.....	123
Figura 92: Diagrama de pareto del reactivo Lix 8180	124
Figura 93: Diagrama de pareto del reactivo Lix 84 I.....	125
Figura 94: Diagrama de pareto del reactivo Lix 9790 N.....	126
Figura 95: Diagrama de pareto del reactivo Lix 984 N.....	126
Figura 96: Diagrama de pareto del reactivo Lix 860 NI.....	127
Figura 97: Diagrama de pareto del reactivo Lix 860 I.....	128
Figura 98: Diagrama de pareto del reactivo Acorga 5640	128
Figura 99: Diagrama de pareto del reactivo Lix 612 NLV	129
Figura 100: Grafica de residuos del reactivo Lix 8180.....	135
Figura 101: Grafica de residuos del reactivo Lix 84 I.....	136
Figura 102: Grafica de residuos del reactivo Lix 9790 N	136
Figura 103: Grafica de residuos del reactivo Lix 984 N	137
Figura 104: Grafica de residuos del reactivo Lix 860 NI	138
Figura 105: Grafica de residuos del reactivo Lix 860 I.....	138
Figura 106: Grafica de residuos del reactivo Acorga 5640	139
Figura 107: Grafica de residuos del reactivo Lix 612 NLV	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades requeridas del orgánico (Sudderth., 1986).....	26
Tabla 2: Lista de algunos diluyentes disponibles en el mercado para la extracción por solventes (Sudderth., 1986)	33
Tabla 3: Designación usual de la emulsión	34
Tabla 4: Energías para diferentes interacciones de fuerzas intermoleculares (Petrucci., 2003) 35	
Tabla 5: Concentración de extractante de los reactivos a utilizar en las pruebas.....	63
Tabla 6: Parámetros operacionales celda de extracción	70
Tabla 7: Parámetros operacionales de pruebas en reactor	71
Tabla 8: Factores de diseño experimental mínimo y máximo	77
Tabla 9: Diseño factorial 2^k	77
Tabla 10: Diseño factorial 2^k (continuación).....	78
Tabla 11: Resultados de coeficientes de correlación del reactivo Lix 8180.....	131
Tabla 12: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 84 I	131
Tabla 13: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 9790 N.....	132
Tabla 14: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 984 N.....	132
Tabla 15: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 860 NI.....	132
Tabla 16: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 860 I	133
Tabla 17: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Acorga 5640.....	133
Tabla 18: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 612 NLV.....	133
Tabla 19: Densidad y viscosidad de aldoximas a 10°C	148
Tabla 20: Densidad y viscosidad de cetoximas a 10°C	148
Tabla 21: Densidad y viscosidad de mezclas a 10°C	148
Tabla 22: Densidad y viscosidad de las aldoximas a 20°C.....	149
Tabla 23: Densidad y viscosidad de las cetoximas a 20°C.....	149
Tabla 24: Densidad y viscosidad de las mezclas a 20°C.....	149
Tabla 25: Tensión interfacial de las aldoximas al 10% de extractante	151
Tabla 26: Tensión interfacial de las cetoximas al 10% de extractante	151
Tabla 27: Tensión interfacial de las mezclas al 10% de extractante	151
Tabla 28: Tensión interfacial de las aldoximas al 15% de extractante	152
Tabla 29: Tensión interfacial de las cetoximas al 15% de extractante	152
Tabla 30: Tensión interfacial de las mezclas al 15% de extractante	152
Tabla 31: Tensión interfacial de las aldoximas al 20% de extractante	153
Tabla 32: Tensión interfacial de las cetoximas al 20% de extractante	153

Estimación y modelación de los arrastres O/A en etapa de extracción en planta de SX
Universidad Católica del Norte

Tabla 33: Tensión interfacial de las mezclas al 20% de extractante	153
Tabla 34: Tiempo de separación de fase al 10% v/v y 10°C.....	155
Tabla 35: Tiempo de separación de fase al 15% v/v y 10°C.....	155
Tabla 36: Tiempo de separación de fase al 20% v/v y 10°C.....	155
Tabla 37: Tiempo de separación de fase al 10% v/v y 20°C.....	156
Tabla 38: Tiempo de separación de fase al 15% v/v y 20°C.....	156
Tabla 39: Tiempo de separación de fase al 20% v/v y 20°C.....	156
Tabla 40: Arrastre O/A al 10% v/v y pH 1,6.....	158
Tabla 41: Arrastre O/A al 10% v/v y pH 2,0.....	158
Tabla 42: Arrastre O/A al 15% v/v y pH 1,6.....	158
Tabla 43: Arrastre O/A al 15% v/v y pH 2,0.....	159
Tabla 44: Arrastre O/A al 20% v/v y pH 1,6.....	159
Tabla 45: Arrastre O/A al 20% v/v y pH 2,0 desde celda de extracción	159
Tabla 46: Arrastre O/A al 10% v/v, 10°C y 500 rpm	160
Tabla 47: Arrastre O/A al 10% v/v, 20°C y 500 rpm	160
Tabla 48: Arrastre O/A al 10% v/v, 10°C y 700 rpm	160
Tabla 49: Arrastre O/A al 10% v/v, 20°C y 700 rpm	161
Tabla 50: Arrastre O/A al 15% v/v, 10°C y 500 rpm	161
Tabla 51: Arrastre O/A al 10% v/v, 20°C y 500 rpm	161
Tabla 52: Arrastre O/A al 15% v/v, 10°C y 700 rpm	162
Tabla 53: Arrastre O/A al 15% v/v, 20°C y 700 rpm	162
Tabla 54: Arrastre O/A al 20% v/v, 10°C y 500 rpm	162
Tabla 55: Arrastre O/A al 20% v/v, 20°C y 500 rpm desde reactor	163
Tabla 56: Arrastre O/A al 20% v/v, 10°C y 700 rpm desde reactor	163
Tabla 57: Arrastre O/A al 20% v/v, 20°C y 700 rpm desde reactor	163
Tabla 58: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 NI.....	165
Tabla 59: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 NI.....	165
Tabla 60: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 NI.....	165
Tabla 61: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 I.....	165
Tabla 62: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 I.....	166
Tabla 63: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 I.....	166
Tabla 64: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Acorga 5640.....	166
Tabla 65: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Acorga 5640.....	166
Tabla 66: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Acorga 5640.....	166
Tabla 67: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 612 NLV	167

Tabla 68: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 612 NLV	167
Tabla 69: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 612 NLV	167
Tabla 70: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 9790 N.....	167
Tabla 71: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 9790 N.....	167
Tabla 72: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 9790 N.....	168
Tabla 73: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 984 N.....	168
Tabla 74: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 984 N.....	168
Tabla 75: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 984 N.....	168
Tabla 76: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 8180	168
Tabla 77: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 8180	169
Tabla 78: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 8180	169
Tabla 79: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 84 I	169
Tabla 80: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 84 I	169
Tabla 81: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 84 I	169
Tabla 82: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 NI.....	170
Tabla 83: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 NI.....	170
Tabla 84: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 NI.....	170
Tabla 85: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 I	170
Tabla 86: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 I	171
Tabla 87: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 I	171
Tabla 88: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Acorga 5640.....	171
Tabla 89: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Acorga 5640.....	171
Tabla 90: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Acorga 5640.....	171
Tabla 91: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 612 NLV	172
Tabla 92: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 612 NLV	172
Tabla 93: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 612 NLV	172
Tabla 94: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 9790 N.....	172
Tabla 95: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 9790 N.....	172
Tabla 96: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 9790 N.....	173
Tabla 97: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 984 N.....	173
Tabla 98: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 984 N.....	173
Tabla 99: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 984 N.....	173
Tabla 100: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 8180	173
Tabla 101: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 8180	174
Tabla 102: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 8180	174

Tabla 103: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 84 I	174
Tabla 104: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 84 I	174
Tabla 105: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 84 I	174

NONMENCLATURA

Aq.	:	Fase acuosa
A/O	:	Acuoso/Orgánico
C	:	Circunferencia del anillo de Dunouy
D	:	Densidad del líquido menos denso
d	:	Densidad del líquido más denso
E1	:	Etapas de extracción 1
E2	:	Etapas de extracción 2
ED	:	Electrolito descargado
EC	:	Electrolito cargado
EW	:	Electro-obtención
F	:	Tensión interfacial corregida
H ₀	:	Hipótesis nula
H ₁	:	Hipótesis alternativa
K	:	Constante bola viscosímetro
LIX	:	Lixiviación
Mod.	:	Modificador
Org.	:	Fase orgánica
OC	:	Orgánico cargado
OD	:	Orgánico descargado
OSC	:	Orgánico semi - cargado
O/A	:	Orgánico/Acuoso
P	:	Valor de la tensión interfacial observada
P ₁	:	Picnómetro seco
P ₂	:	Picnómetro con orgánico
P ₃	:	Picnómetro con agua destilada
PLS	:	Solución rica de cobre
R	:	Radio del anillo de Dunouy

r	:	Radio alambre del anillo de Dunouy
RF	:	Refino
R^2	:	Coefficiente de determinación
R^2_{ajustado}	:	Coefficiente de determinación ajustado
S1	:	Re-extracción 1
SR	:	Semi - refino
SX	:	Extracción por solventes
t	:	Tiempo
TSF	:	Tiempo de separación de fases
UCN	:	Universidad Católica del Norte
VI	:	Variable independiente
VD	:	Variable dependiente
$w.$:	Coefficiente estequiométrico
z	:	Coefficiente estequiométrico
α	:	Nivel de significancia
β	:	Efecto del nivel j -ésimo del factor B de las columnas
ε	:	Errores o residuos
ρ	:	Densidad liquido
ρ_r	:	Densidad bolita
σ^2	:	Varianza
τ_i	:	Efecto del nivel i -ésimo del factor A de los renglones
μ	:	Viscosidad dinámica

SUMMARY

The following study aims to estimate the O/A entrainment in the extraction step under different operating conditions and how to model it based on physical-chemical variables.

One of the main problems showed by solvent extraction operations (SX) are the entrainment of a phase in the other, especially the drag of organic reagent in the aqueous phase, it's basically that these trailers adversely impact the performance and quality stages adjacent to the solvent extraction (SX), such as leaching and electro winning respectively. Because of this, it is of interest to investigate the factors and variables that promote physical and chemical situation and based on these variables model the dragging, with the aim of improving the performance of SX.

This investigation evaluates the entrainment generated by eight commercial reagents (ketoximes, aldoxime and mixtures aldoxime/ketoxime) at concentrations of 10, 15 and 20% v / v dissolved in solvent extractant Conosol 170 ES and Orfom SX 12 for testing in cell pilot reactor, respectively. It applies a factorial design modifying operational parameters such as temperature, agitation and pH, allowing to model them in a pattern model.

From the results presented, it is possible to infer that the ketoxime presents less O/A entrainment being these in an average between 40% and 20% less compared to the aldoxime and mixtures (aldoxime / ketoxime) respectively.

The average model for the reactants is given by equation $Entrainment\ O / A = C - B * Temperature - pH + E * F * Agitation$, where C, B, E and F are specific constants to each item. The waste meets the assumptions of the model, implying that the model is statistically valid.

The models obtained for each reagent tested are:

- Lix 8180: *Entrainment O/A = 54,7 - 15,2 Temperature - 5,55 pH + 14,6 Agitation*
- Lix 84 I: *Entrainment O/A = 9,69 - 2,64 Temperature - 1,73 pH + 3,55 Agitation*
- Lix 9790 N: *Entrainment O/A = 22,1 - 6,04 Temperature - 2,07 pH + 9,29 Agitation*
- Lix 984 N: *Entrainment O/A = 28,8 - 10,2 Temperature - 3,35 pH + 7,14 Agitation*
- Acorga 5640: *Entrainment O/A = 59,9 - 15,7 Temperature - 6,44 pH + 18,9 Agitation*
- Lix 612 NLV: *Entrainment O/A = 69,6 - 18,1 Temperature - 3,67 pH + 13,4 Agitation*
- Lix 860 NI: *Entrainment O/A= 55,8 - 19,7 Temperature - 11,4 pH + 17,1 Agitation*
- Lix 860 I: *Entrainment O/A = 44,8 - 21,5 Temperature - 8,86 pH + 17,3 Agitation*

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estimar los arrastres O/A en la etapa de extracción bajo diferentes condiciones operacionales y modelarlos en función de variables físico-químicas.

Uno de los principales problemas que presentan las operaciones de extracción por solventes (SX) son los arrastres de una fase en la otra, en especial, el arrastre del reactivo orgánico en la fase acuosa, estos arrastres impactan desfavorablemente en el desempeño y la calidad de las etapas adyacentes a la extracción por solventes (SX), como son la lixiviación y la electro-obtención respectivamente. Debido a esto es de interés investigar los factores y variables físico-químicos que promueven esta situación y en base a estas variables modelar los arrastres, con el propósito de mejorar el desempeño de SX.

El presente trabajo evalúa los arrastres generados por ocho reactivos comerciales (aldoximas modificadas, aldoximas cetoximas y mezclas aldoxima/cetoxima) a concentraciones de 10, 15 y 20 %v/v de extractante disuelto en solvente Conosol 170 ES y Orfom SX 12 para las pruebas en celda piloto y reactor, respectivamente. Se aplica un diseño factorial modificando parámetros operacionales tales como temperatura, agitación y pH, lo que permite modelarlos en un modelo de medias.

De los resultados obtenidos observa que la cetoxima presenta menor arrastre O/A siendo estos en promedio un 40% y 20% menor en comparación a las aldoximas con o sin modificador y las mezclas (aldoxima/cetoxima) respectivamente.

El modelo de medias para los reactivos está dado por la ecuación $Arrastre\ O/A = C - B * Temperatura - E * pH + F * Agitación$; donde C, B, E y F son constantes específicas de cada reactivo. Los residuos cumplen con los supuestos del modelo, lo que implica que estadísticamente el modelo es válido.

Los modelos alcanzados para cada reactivo evaluado son:

- *Lix 8180* :Arrastre O/A = 54,7 - 15,2 Temperatura - 5,55 pH + 14,6
Agitación
- *Lix 84 I*: Arrastre O/A = 9,69 - 2,64 Temperatura - 1,73 pH + 3,55
Agitación
- *Lix 9790 N*: Arrastre O/A = 22,1 - 6,04 Temperatura - 2,07 pH + 9,29
Agitación
- *Lix 984 N*: Arrastre O/A = 28,8 - 10,2 Temperatura - 3,35 pH + 7,14
Agitación
- *Acorga 5640*: Arrastre O/A = 59,9 - 15,7 Temperatura - 6,44 pH + 18,9
Agitación
- *Lix 612 NLV*: Arrastre O/A = 69,6 - 18,1 Temperatura - 3,67 pH + 13,4
Agitación
- *Lix 860 NI*: Arrastre O/A= 55,8 - 19,7 Temperatura - 11,4 pH + 17,1
Agitación
- *Lix 860 I*: Arrastre O/A = 44,8 - 21,5 Temperatura - 8,86 pH + 17,3
Agitación

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes generales

La mayoría de las plantas hidrometalurgias cuentan con una serie de equipos internos y anexos a SX que permiten atenuar tanto las pérdidas de reactivo orgánico, así como los efectos perjudiciales en las otras etapas producida por el orgánico arrastrado, entre estos equipos se puede mencionar los “picked fence”, distribuidores de flujo, pos decantador, cintas oleo-fílicas en piscinas de refinó y estanques de electrolito rico, filtros Chuquicamata y a presión (Spintek y Delkor), coalescedores, columnas de flotación Magma, celdas de sacrificio en electro obtención, etc. Sin embargo, a pesar de que todas estas medidas de mitigación disminuyen las pérdidas de reactivo, pero no eliminan totalmente los problemas generados por los arrastres (Vera., 2010).

Las pérdidas de orgánico de una planta hidrometalurgica se producen principalmente por arrastres O/A en las etapas de extracción y re-extracción, con un 86% y 3% respectivamente de la pérdida total,(Vera., 2010). Tal situación genera la necesidad de estimar y modelar los arrastres O/A en la etapa de extracción respecto a su relación con variables físico-químicas.

Los arrastres en SX son consecuencia de la interacción de innumerables variables, para lo cual se realiza un diseño experimental que considera un diseño factorial de las principales variables que afectan los arrastres tales como la agitación, temperatura y pH, para modelar los arrastres O/A.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estimar los arrastres O/A en la etapa de extracción bajo diferentes condiciones operacionales y modelarlos en función de variables físico-químicas.

1.2.2 Objetivos específicos

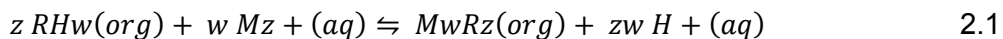
- Desarrollar procedimiento para la toma de muestra del reactor y celda de extracción, además comparar métodos.
- Caracterización de propiedades químicas y físicas de reactivos puros.
- Desarrollar diseño de experimento, aplicando diseño factorial 2^k considerando las siguientes variables, temperatura, agitación y pH.
- Evaluar el efecto del tipo de oxima en los arrastres O/A bajo distintas condiciones operacionales.
- Estimar arrastres y desarrollar modelo de acuerdo a los resultados obtenidos e informar.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1. Extracción por solventes

La extracción por solventes es un proceso metalúrgico el cual consiste en purificar y concentrar las especies solubles presentes en una fase líquida, las cuales se distribuyen preferencial y selectivamente en una segunda fase, también líquida inmiscible entre sí. La fase portadora de las sustancias disueltas, está constituida esencialmente por agua (fase acuosa) y la (fase orgánica) de extractante y solvente (Reghezza.,1987).

El metal es extraído desde la fase acuosa por una molécula orgánica que se encuentra contenida en la fase orgánica. En los dos líquidos inmiscibles ocurre una reacción interfacial y de transferencia de moléculas. La Ecuación 2.1 describe la reacción química del proceso.



z y w son coeficientes estequiométrico de la especie. La abreviación *org* y *aq* es usada para indicar la presencia de las especies en la fase orgánica y acuosa (Reghezza.,1987).

Como se observa en la Ecuación 2.1, el sentido de la reacción está gobernado por la acidez del sistema. Basado en esta característica de la reacción el proceso de extracción por solventes se lleva a cabo en dos etapas, extracción y re-extracción.

En la etapa de extracción, la solución impura que proviene de la lixiviación con baja acidez (pH entre 1,4 y 2,5) conteniendo al cobre, denominada PLS (solución rica en cobre), se contacta con la fase orgánica de muy bajo contenido en cobre (orgánico descargado), debido a la acidez del PLS la reacción 2.1 se desplaza hacia la derecha, obteniéndose después de que ambas soluciones han pasado por todas las etapas de extracción, una fase orgánica rica en cobre (orgánico cargado) y una fase acuosa (refino) que presenta una baja concentración de cobre. La solución refino obtenida retiene la mayor parte de las impurezas (Fe, Al, Mn, Mg, Zn, Ni, Cl⁻, etc.) sale con una alta acidez, por lo cual, es recirculada a la lixiviación (Gutiérrez., 2001).

La etapa de re-extracción corresponde a la etapa de descarga del cobre presente en la fase orgánica. La descarga se logra contactando la fase orgánica cargada, con una solución acuosa de alta acidez (180 a 200 g/L) en la cual se descarga el cobre. En el proceso LIX-SX-EW, la solución de alta acidez utilizada es la proveniente de electro-obtención (electrolito pobre).

De la etapa de re-extracción se obtienen dos soluciones: una orgánica pobre en cobre que vuelve a la etapa de extracción y una solución acuosa rica en cobre, denominada electrolito rico, que es enviada al proceso de electro-obtención (Gutiérrez.,2001).

El esquema presente en la Figura 1 describe el circuito LIX-SX-EW, en el cual se logra disolver, extraer y depositar el cobre.

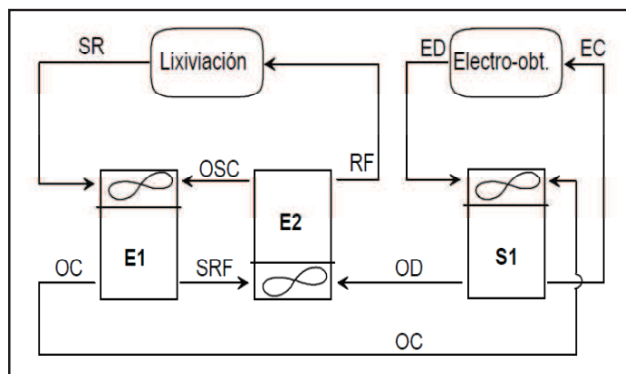


Figura 1: Esquema de circuito LIX-SX-EW (Gutierrez.,2001)

2.2. Reactivo orgánico

La implementación de la extracción por solventes requiere de un reactivo orgánico que presente una serie de propiedades como se muestra en la Tabla 1, sin embargo es difícil para un reactivo lograr satisfacer los requerimientos de la SX, por lo que la estrategia consiste en separar en dos conjuntos, extractante y solvente (Sudderth.,1986).

Tabla 1: Propiedades requeridas del orgánico (Sudderth.,1986)

Características requeridas	Propiedad relacionada
Eficiencia de extracción	Alta capacidad de carga
	Fácil re-extracción
	Selectividad
Eficiencia de separación	Baja viscosidad
	Baja densidad
	Alta tensión interfacial
Precio y seguridad en el manejo	Seguridad/ Toxicidad
	Estabilidad química
	Precio

2.2.1. Clases de extractantes

El extractante es el principal componente de la fase orgánica cuya característica más importante es poder reaccionar y atrapar selectivamente un elemento disuelto específico y permitir la descarga hacia una solución desde la cual sea posible su recuperación.

Existen distintas clases de extractantes, que a continuación se detallan.

2.2.1.1. Esteres

Estos compuestos son derivados del ácido fosfórico, por ejemplo D2EHPA y la familia de los CYANEX (Gupta.,2003).

2.2.1.2. Ácidos carboxílicos

Numerosos ácidos han sido sugeridos como reactivo de extracción, tales como el ácido palmítico¹ o ácido esteárico². Comúnmente son usados los ácidos de la serie Versatic, el cual es el nombre comercial de los ácidos nonanoico y decanoico. La Figura 2 muestra la estructura química del Versatic - 10, que es un ácido decanoico. A la fecha existen reportes que indican que se ha utilizado este extractante para el cobre (Algret et al., 1988).

¹ Ácido graso saturado de cadena larga, formado por dieciséis átomos de carbono.

² Ácido graso saturado de cadena larga, formado por dieciocho átomos de carbono.

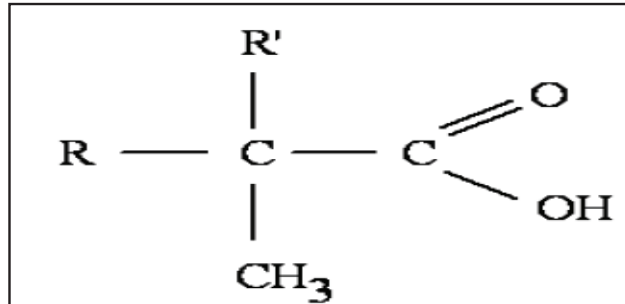


Figura 2: Estructura química del Versatic-10 (Algret et al., 1988)

2.2.1.3. Oximas

Estas moléculas contienen por lo menos un grupo oximino N-OH. Fueron los primeros usados en la química analítica en la precipitación del cobre.

Existen dos tipos principales: α -hidroxi-oximas y β -hidroxi-oximas, las primeras son totalmente hidroxi-oximas alifáticas, el uso de este tipo de oxima está discontinuado en la industria ya que presenta una pobre eficiencia. Las β -hidroxi-oximas contienen uno o dos anillos aromáticos, la primera generación estaba constituida por dos anillos, en ésta, el reactivo mostraba una buena selectividad, pero una baja eficiencia, por lo que se desarrolló una segunda generación de hidroxi-oximas con un anillo aromático, tal como se muestra en la Figura 3 (Handbook.,2007).

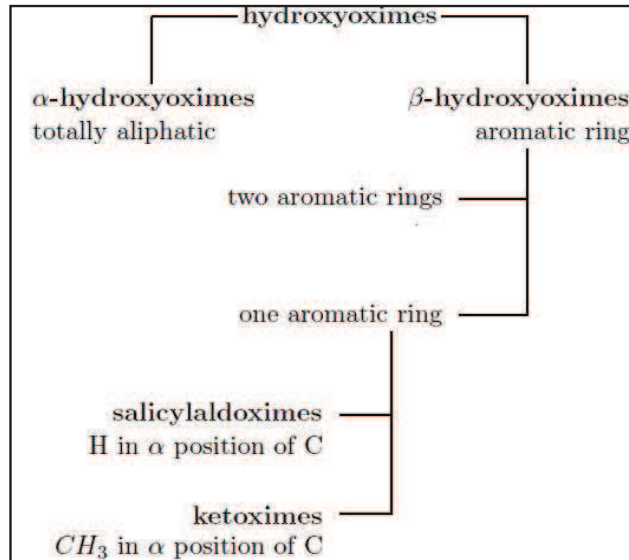


Figura 3: Clasificación de las hidroxi-oximas (Handbook.,2007)

La segunda generación de hidroxi-oximas se desarrolló con un anillo aromático. La Figura 4 muestra la estructura química del compuesto activo de la hidroxi-oxima de segunda generación.

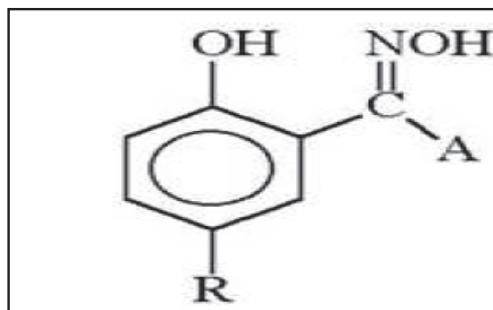


Figura 4: Estructura química hidroxi-oxima (MCT Redbook.,1998)

Donde, A puede ser una CH_3 o H, dependiendo si es cetoxima o aldoxima.

Cetoxima: El grupo A comparte un vínculo con el carbono que otorga al grupo oximio funcional CH_3 . Estas fueron las primeras en ser utilizadas comercialmente para la extracción de cobre a partir de soluciones diluidas y fueron utilizados exclusivamente durante 12 años. (MCT Redbook.,1998). Sus principales propiedades son: excelente separación de fases, bajas pérdidas de orgánico por arrastre, baja formación de borras y una muy buena estabilidad química bajo condiciones en las que las aldoximas se degradan rápidamente.

Su uso sin embargo fue limitado debido a dos desventajas principales: es un extractante moderado de cobre y tiene una cinética lenta a bajas temperaturas (Spence.,2000)

Aldoxima: El grupo A comparte un vínculo con el carbono que otorga al grupo oximio funcional H. Para superar las desventajas presentes en las cetoximas, se desarrollaron las aldoximas. Sin embargo, estos reactivos son extractantes tan fuertes que requieren un modificador para realizar eficientemente la re-extracción. La utilización de estos modificadores posee ciertas desventajas tales como: hidrólisis y degradación del reactivo, mayor transferencia de Fe al electrolito, mayor pérdida de orgánico por arrastre físico y mayor formación de borra. Dentro de este grupo se diferencian las nonil-aldoximas y las dodecil-aldoximas (Kordosky.,1983).

En la práctica, las aldoximas se usan en combinación con un modificador de equilibrio o combinadas con una cetoxima. La elección de uno u otro dependerá exclusivamente de las características de cada operación, pero en general los modificadores pueden acarrear problemas por aumento en la viscosidad de la fase orgánica o en la degradación del extractante (Spence.,2000).

2.2.2. Mecanismo

El mecanismo implicado en la extracción del ion metálico desde la fase acuosa hacia la fase orgánica formando el complejo órgano-metálico puede ser de los siguientes tipos:

2.2.2.1. Solvatación /par iónico

Los agentes solvatantes neutros son los que forman enlaces de coordinación con el metal, desplazando simultáneamente las moléculas de agua y formando un complejo neutro por asociación iónica. Algunos compuestos orgánicos tales como alcoholes, éteres, cetonas, alqui-fosfatos, etc., que poseen un átomo de oxígeno donante de electrones, pueden solvatar un ion metálico y servir como extractantes. Un extractante neutro importante es el tri-butil-fosfato (TBP), usado en el procesamiento de materiales nucleares (Gupta.,2003).

2.2.2.2. Intercambio iónico

Se refiere a la transferencia de un ion metálico de la fase acuosa a la fase orgánica, y al mismo tiempo un ion del extractante se transfiere a la fase acuosa. Este mecanismo involucra a los ácidos fosfóricos, ácidos carboxilos y ácidos nafténicos³(Domic.,2001).

³ Los ácidos nafténicos se derivan del ciclo-parafinas del petróleo, probablemente por oxidación.

2.2.2.3. Quelación

Este tipo de mecanismo forma una estructura de anillos que envuelven a la molécula de extractante como una ligazón selectiva para el ión metálico, dejando los restantes cationes en solución, los extractantes tipo quelantes son capaces de formar un compuesto orgánico con el metal de interés (Itabashi.,2003).

La transferencia de un ion metálico toma lugar gracias a la formación de un compuesto quelato-metálico eléctricamente neutro, dónde el agente quelante satisface tanto la valencia como el número de coordinación que requiere dicho ion metálico. Aparte de enlazarse con el ión metal, el extractante libera un ión hidrógeno en la solución acuosa desde la cual extrajo el metal. Este mecanismo involucra las oximas (Itabashi.,2003).

2.2.3. Diluyente

El diluyente en el orgánico es de vital importancia ya que satisface algunas necesidades tales como:

Disminuir la viscosidad: permite una buena separación de las fases involucradas en el sistema.

Baja solubilidad con el agua: previene la contaminación entre ambas fases.

Estabilidad química: presenta una baja tasa de evaporación y alto punto de inflamación.

Bajo precio: el diluyente constituye una parte importante del orgánico, por lo que el precio es un factor crítico.

Generalmente los diluyentes son hidrocarburos y/o una mezcla de ellos (kerosene). La Tabla 2 muestra algunos diluyentes comerciales disponibles.

Tabla 2: Lista de algunos diluyentes disponibles en el mercado para la extracción por solventes (Sudderth.,1986)

Tipo de diluyente	Nombre comercial	Serie	Manufactura
Kerosene	Orfom	SX-7	Chevron Phillips
		SX-12	
Kerosene	Escaid	100	Exxon Mobil
		110	
Kerosene	Shellsol	2046	Shell Chemicals
		2325	
Kerosene	Napoleum	470	Kerr-McGee
Kerosene	Kermac	470 D	Kerr-McGee

2.3. Emulsión

2.3.1. Composición de la emulsión

Bajo el contexto en el cual nos encontramos, es de suma importancia conocer la composición y naturaleza de la emulsión. La composición de la emulsión de dos líquidos inmiscibles se puede caracterizar en dos fases.

La primera fase puede ser una fase acuosa, esta puede contener uno o más solutos. La segunda fase, puede ser una fase orgánica, que también puede contener solutos, estos pueden ser solubles en una u otra fase, depende de las diferentes interacciones moleculares implicadas en los orgánicos y acuosos. (Hanbook.,2007).

Es interesante observar si el extractante tiene un papel importante como emulsionante, si se da el caso, el reactivo tendrá una influencia en la estabilidad de la emulsión. La Tabla 3 muestra la designación usual según la naturaleza de la emulsión.

Tabla 3: Designación usual de la emulsión

Designación	Fase continua
O/A	Acuosa
A/O	Orgánica

La sigla “O/A” significa que la fase orgánica está dispersa en la fase acuosa, una técnica para determinar la emulsión se basa en la conductividad.

2.3.2. Tensión interfacial

Es útil recordar algunas definiciones de dos conceptos que se confunden con frecuencia, es decir, la tensión superficial y la tensión interfacial. Ambos son la manifestación de la tensión en la superficie. La tensión superficial se define como la fuerza que existe en la superficie de un líquido debido a la atracción entre las moléculas que se oponen a la alteración de la superficie (Le Neindre.,1993). En particular, es la fuerza de tracción que actúa sobre un elemento situado en un plano tangente a la superficie, y que se opone a la dilatación de éste. Las dimensiones de esta tensión de la superficie son los de una fuerza dividida por la longitud.

Si el sistema implica una interfase líquido / gaseoso, la tensión en la superficie se llama tensión superficial, por otro lado, si el sistema implica una interfase entre dos líquidos inmiscibles, la tensión en la superficie es llamada tensión interfacial (Castellan.,1987).

Las mediciones de la tensión interfacial de las fases orgánica y acuosa son de interés en los procesos de extracción por solvente, sus valores informan acerca de la energía proporcionada para la creación de nuevas interfaces durante la dispersión, y por lo tanto la creación de las emulsiones. Cuanto menor sea el valor de la tensión interfacial, menor es la energía ofrecida para formar una emulsión. Del punto de vista opuesto, mientras más fácil se crea una emulsión, es más estable (Handbook.,2007).

2.3.3. Interacción molecular

Es sabido que la miscibilidad de las fases se puede explicar sobre la base de las fuerzas intermoleculares o inter-iónicas. En particular, dos fases líquidas son miscibles si comparten el mismo tipo de fuerzas intermoleculares. Esto tiene un vínculo con la tensión interfacial del sistema: mientras más distintas sean las fuerzas intermoleculares mayor será la tensión interfacial (Brochette.,2006).

La Tabla 4 muestra las típicas energías implicadas en las fuerzas intermoleculares

Tabla 4: Energías para diferentes interacciones de fuerzas intermoleculares (Petrucci., 2003)

Fuerza intermolecular	Especie implicada	Energía (kJ/mol)
ion - ion	solo iones	250
enlace hidrogeno	moléculas N, O , F y H	20
ion - dipolo	iones y moléculas polares	15
dipolo - dipolo permanente	moléculas polares permanentes	2
dipolo - dipolo inducido	al menos una molécula polar	2
dispersión (London)	cualquier tipo de molécula	2

A partir de la Tabla 4 se muestra a continuación una lista de posibles fuerzas intermoleculares y el efecto en la tensión interfacial del sistema.

2.3.3.1. **Acuoso**

Moléculas del agua: la interacción esperada son los puentes de hidrogeno, dipolo – dipolo y dipolo – dipolo inducido.

Iones de cobre: la interacción esperada es ion- dipolo.

2.3.3.2. **Orgánico**

Diluyente: se considera la composición del diluyente como n-dodecano, la interacción esperada son solamente de dispersión.

Extractante: las interacciones esperadas corresponden a las dipolo-dipolo y dispersión; las de puente hidrogeno pueden ocurrir a través de la función alcohol.

2.3.3.3. **Acuoso / Diluyente**

Las moléculas del diluyente comparten las fuerzas de dispersión entre sí, el diluyente compartirá la fuerza de dispersión pero también las dipolo- dipolo inducido con el acuoso. Sin embargo, las moléculas del agua comparten entre sí las fuerzas con mayor fuerza tales como el puente hidrogeno, esto significa que las interacciones acuoso / acuoso son energicamente más favorables que las acuoso / diluyente, por esta razón ambas fases son inmiscibles, tal como se muestra en la Figura 5.

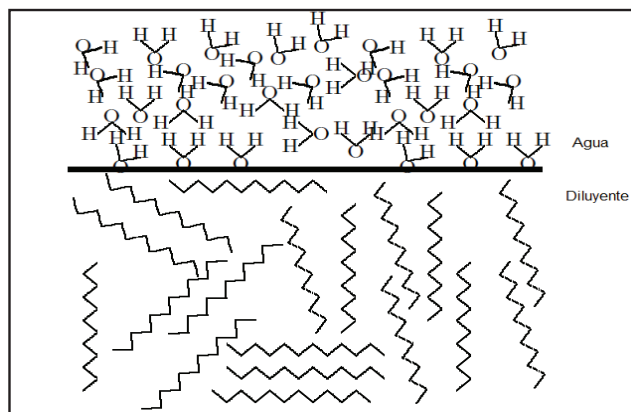


Figura 5: Sistema acuoso / diluyente (Handbook.,2007)

2.3.3.4. Acuoso / Orgánico

Sí las moléculas de extractante están presentes en el solvente, se genera la interacción de fuerzas de dispersión entre la cola del extractante y el diluyente. La cabeza polar del extractante va a interactuar a través de las fuerzas dipolo – dipolo inducido y dispersión con el solvente.

Las moléculas del extractante se encuentran en su mayor parte en forma de micelas⁴ inversas. Esto asegura que las cabezas de las moléculas pueden interactuar a través de las fuerzas dipolo – dipolo y dispersión.

Sí las moléculas del extractante se absorben en el interfase, la cabeza polar va a interactuar a través de las fuerzas de dispersión y dipolo - dipolo inducido con el acuoso, mientras que la cola va a interactuar a través de la fuerza de dispersión con el solvente.

⁴ Se denomina micela al conglomerado de moléculas que constituye una de las fases de los coloides.

Finalmente se llega a la conclusión que las moléculas de los extractantes son anfífilos⁵, además es miscible en el diluyente ya que al presentar una cola larga se ven favorecidas las fuerzas de dispersión (London), como se muestra en la Figura 6.

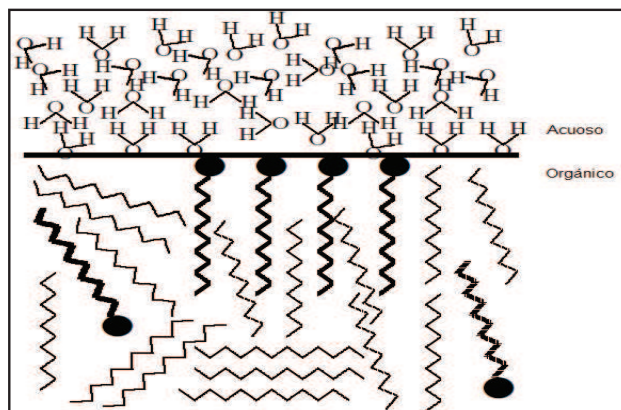


Figura 6: Sistema acuoso / orgánico (Handbook.,2007)

2.4. Arrastre de orgánico en la fase acuosa

Los arrastres de orgánico en acuosos O/A, se producen y/o dependen de una serie de parámetros, tal como mencionan Skelland y Lee.(1971); Van Heuven y Beck.(1971); McClarey y Mansoori.(1978), (citado por Semiat.,1995) el tamaño de distribución, movimiento y coalescencia de las gotas, tipos de dispersión, diámetro del mezclador y existencia de sólido o gas en la dispersión.

⁵ Una molécula anfífilica contiene tanto un grupo hidrofílico e hidrofóbico

Además, es importante reconocer la influencia de los parámetros operacionales tales como en las razones de las fases, características del mezclador, ya sea, tipo de agitador, intensidad de la agitación y tipo de aspa en la densidad, viscosidad y tensión interfacial de las fases (Semiat et al.,1995).

Los arrastres O/A se producen principalmente en la etapa de extracción, Vera (2010), establece que el 86% de las pérdidas de orgánico es producto de este concepto. Se debe considerar que la tesis que plantea Vera (2010) corresponde a la situación de una planta específica, la cual presenta una configuración atípica al compararla con las principales plantas de extracción por solventes de Chile.

Clasificar el arrastre O/A por causas mecánicas y físico-químicas, es complejo, ya que ambas se encuentran enlazadas, por ejemplo la agitación es mecánico y físico-químico a la vez, lo que hace muy difícil la cuantificación de los arrastres O/A generado por cada una.

2.4.1 Banda de dispersión

La contaminación entre ambas fases, depende en gran medida del espesor de la banda de dispersión con que se trabaja. La relación que existe entre el espesor de la banda de dispersión y la magnitud de los arrastres, es esquematizada en la Figura 7.

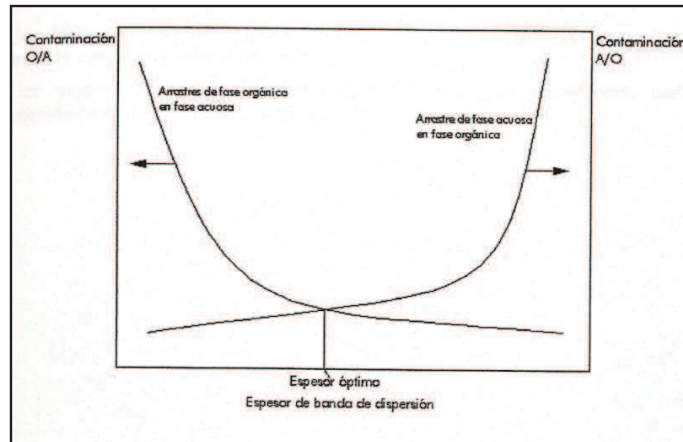


Figura 7: Relación banda de dispersión y arrastre (Gutierrez.,2001)

Como se observa en la Figura 7, existe un espesor de banda de dispersión óptimo, para el cual las contaminaciones por arrastre de ambos tipos son reducidos a un mínimo, esta situación queda limitada al espesor de la banda de dispersión.(Gutiérrez .,2001).

Respecto al efecto que tiene el tipo de continuidad en las contaminaciones, se establece, que en continuidad orgánica se tienen bajo nivel de arrastre O/A y alta contaminaciones A/O. En continuidad acuosa se tiene altas contaminaciones O/A y bajas contaminaciones A/O (Reghezza.,1987).

SX Kinetics .(2007), estableció que los niveles de arrastre de orgánico en acuoso en continuidad acuosa no dependen de manera significativa de la razón O/A a menos que se trabaje en razones inferiores a 1, tal como lo muestra la Figura 8.

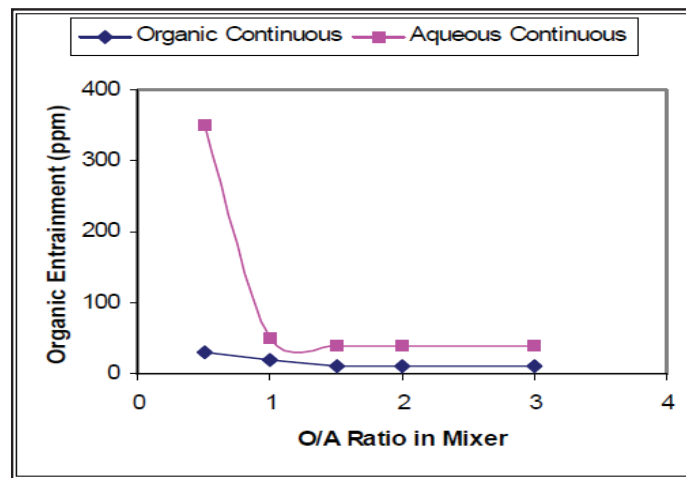


Figura 8: Arrastre O/A a distintas continuidades (SX Kinetics.,2007)

2.4.2 Coalescencia y rotura de gota

Las pérdidas de orgánico por arrastre se encuentran íntimamente relacionadas con la distribución del tamaño de gota en el mezclador.

La distribución del tamaño de gotas, se desarrolla como resultados de dos procesos: la rotura de la gota debido a la velocidad de disipación de la energía en la fase continua y a la coalescencia entre las gotas. La velocidad de los proceso de rotura y coalescencia de la gota son también gobernados por la tensión interfacial y por la sustentación de ambas fases (Patwardham et al,2010).

El mecanismo de coalescencia se puede dividir en dos partes macroscópicas. La primera parte se caracteriza por la eliminación de la fase continua que se interpone entre las gotas. La segunda es relativamente lenta, la gota escurre suavemente por una capa muy delgada que la separa hasta estar cerca de la interfase y la fase madre. El escurrimiento continúa hasta que la capa en la interfase se rompe permitiendo que la gota se una a la fase madre (Bozzano et al.,2010).

2.4.2.1. Efecto del tipo, localización y velocidad del agitador en el tamaño de gota

La coalescencia y rompimiento de las gotas en el mezclador van a indicar que tanto arrastre de una fase en la otra se genera, una de las variables más importante es el tipo de agitador que se usa.

La velocidad de rotura de una gota depende tanto de la hidrodinámica como de las propiedades fisicoquímicas del fluido. La velocidad de coalescencia depende de dos situaciones, la primera de la frecuencia de la colisión entre las gotas y la segunda de la eficiencia de la colisión. En el caso de la primera, esta depende de la cantidad de gotas presentes por unidad de volumen en la dispersión. El caso de la segunda, depende de las propiedades fisicoquímicas y de la hidrodinámica del fluido (Stamatoudis et al.,2005)

Existen una serie de estudios sobre el efecto que tienen las propiedades físicas y geometría tanto del reactor como del agitador en el tamaño de gota. Brown y Pitt.(1974) sostienen que sí el diámetro del aspa del agitador y la velocidad rotación son iguales, el ancho del aspa no produce ninguna alteración en el tamaño de gota que se genera en la mezcla.

Stamatoudis et al (2005), hicieron pruebas experimentales para saber el efecto que tiene el número de paletas en el aspa en el tamaño de la gota, para ello compararon el uso de aspa de disco con dos, cuatro, seis y ocho paletas, como se observa en la Figura 9.

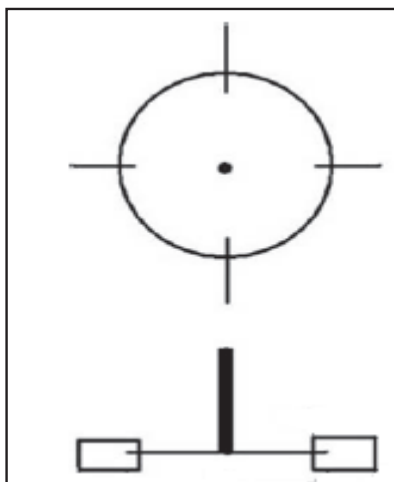


Figura 9: Esquema del aspa de disco (Stamatoudis et al.,2005)

El resultado más importante de este trabajo es que el diámetro de Sauter⁶ siempre aumenta cuando se reduce el número de paletas en el aspa. La disminución de ocho a dos paletas genera un incremento en el tamaño de gota en un 52%. Al disminuir el número de paletas no solo se incrementa el tamaño de gota también aumenta la tasa de coalescencia, ya que las gotas que chocan tienen más tiempo para unirse (Stamatoudis et al.,2005).

Semiat et al.(1995) realizó una investigación en la cual consideró evaluar el efecto de la velocidad y tamaño del agitador al mezclar dos líquidos inmiscibles en la separación de fases, utilizando agua y parafina a 20°C. De los resultados obtenidos, destaca que al variar la velocidad del agitador de 180 a 457 rpm aumenta el tiempo en la separación con ello disminuye la coalescencia, además al aumentar el tamaño del aspa de 2,3 cm a 6,5 cm sobre los 330 rpm no se observa una diferencia importante en el tiempo de separación, tal como se observa en la Figura 10.

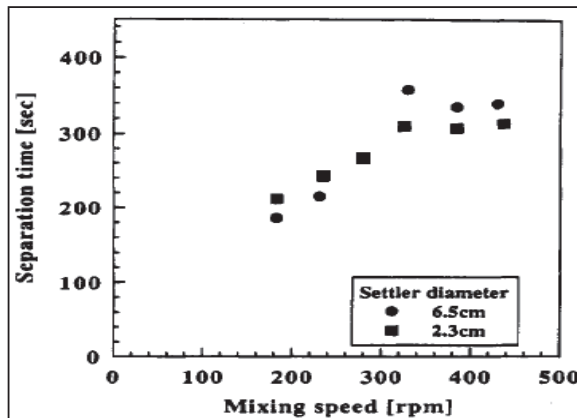


Figura 10: Tiempo de separación de las fases vs velocidad de agitación (Semiat et al.,1995)

⁶ Es el volumen promedio por unidad de superficie. Se utiliza cuando se considera el área superficial por unidad de volumen del lecho de relleno

Ruiz et al.(2002), establece que a medida que aumenta la velocidad de agitación se tiende a reducir la coalescencia de las gotas, disminuyendo la distribución del tamaño de las gotas, debido al aumento del esfuerzo inercial externo derivado desde la turbulencia provoca un desequilibrio de las gotas, por lo tanto el diámetro máximo de la gota disminuye y toda la distribución de tamaño de gotas se hacen más finas, tal como se muestra en la Figura 11.

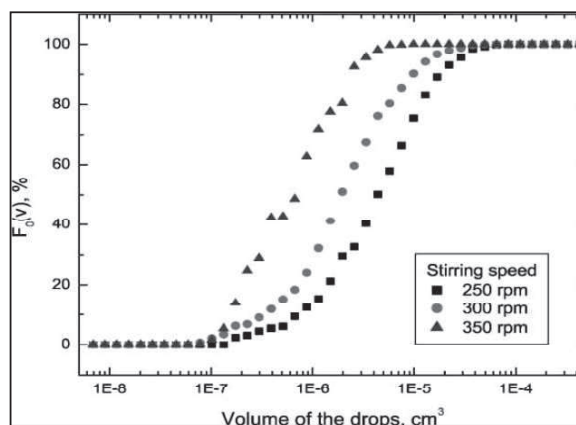


Figura 11: Efecto de la agitación en la distribución de tamaño de las gotas (Ruiz et al.,2002)

2.4.2.2. Efecto de la viscosidad en el tamaño de gota

Denkov et al.(2007) estudió la distribución del tamaño de micro-gotas y la coalescencia entre ellas, donde se evaluó el efecto de la viscosidad en la fase dispersa utilizando valores experimentales analizados en un método numérico. En la Figura 12 se ejemplifica el proceso de formación de micro-gotas.

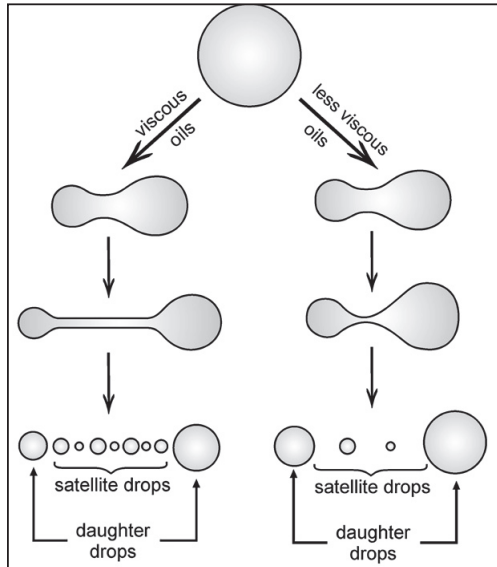


Figura 12: Esquema del efecto de la viscosidad en la coalescencia (Denkov et al.,2007)

Como se observa en la Figura 12 la viscosidad tiene un notorio impacto en la coalescencia de las gotas, *satellite drops* corresponde a una cadena de micro-gotas que se generan alrededor de la gota secundaria, Denkov et al.(2007) establece que es más probable que se formen gotas secundarias que micro-gotas con aceites de baja viscosidad.

Ruiz et al.(2002) evaluó el efecto que tiene la concentración de extractante en la distribución de tamaño de gotas. Al aumentar la concentración de extractante aumenta la viscosidad de la solución, además establece que no existe una diferencia relevante en la distribución del tamaño de las gotas, al aumentar la concentración de extractante como se observa en la Figura 13.

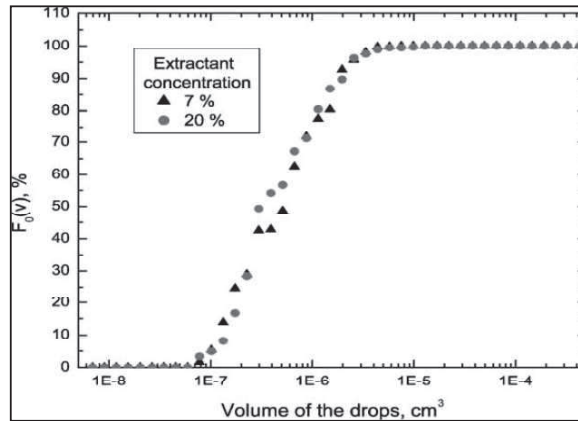


Figura 13: Efecto de la concentración de extractante en la distribución de tamaño de gotas (Ruiz et al.,2002)

El eje de la abscisa corresponde al volumen de gotas y la ordenada al porcentaje acumulado de la distribución de tamaño, las condiciones de esta prueba fue a una temperatura de 22°C, agitación de 300 rpm durante 30 minutos, la fase acuosa con 0,25 M de Na₂SO₄ y a un pH de 5,7.

2.4.2.3. Efecto del pH en el tamaño de gota

El desarrollo de la coalescencia está particularmente influenciado por el pH, existen una serie de estudios que explican este efecto.

Kraume et al .(2006), observó el efecto que tiene el pH en la distribución del tamaño de gota en una dispersión liquido- liquido. Esta investigación se llevo a cabo usando un reactor de vidrio con baffle y un agitador Roshton usando como fase continua el agua y como fase dispersa al tolueno, modificando el pH entre 1 y 13, además en cada aumento de pH se varió la agitación entre 400 y 700 rpm.

A un alto pH la coalescencia se ve obstaculizada debido al efecto electroquímico de doble capa alrededor de las gotitas. En la superficie de las gotas orgánicas los iones hidróxidos son especial y espontáneamente absorbidos (Marinova et al.,1996). La carga estable de la dispersión aceite – agua de las gotitas con el incremento del pH el espesor de la capa difusa crece inhibiendo la coalescencia (Kraume et al.,2006). La Figura 14 muestra el efecto del pH en un sistema agua – tolueno.

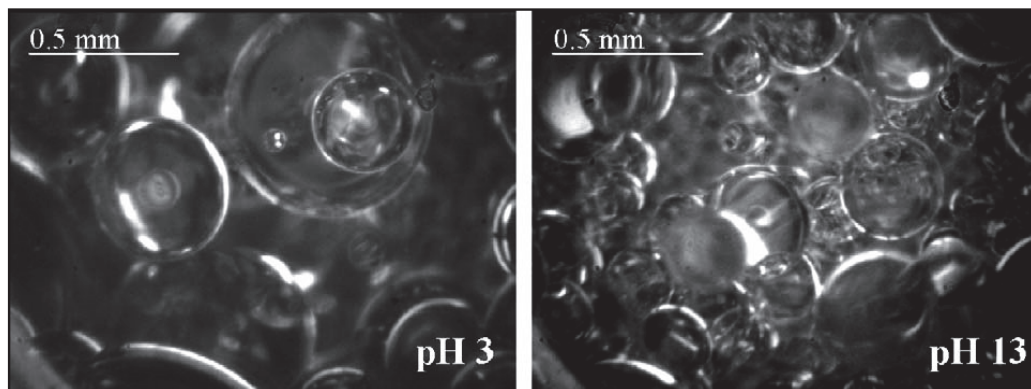


Figura 14: Sistema agua - tolueno, 10% dispersa en la fase a 400 rpm (Kraume et al.,2006)

Ruiz et al.(2002), en comparación a lo que establece (Kraume et al.,2006), encontró que al incrementar el pH se aumenta la coalescencia, como se observa en la Figura 15 esta situación la explica no en función de la tensión interfacial, sino en las propiedades del extractante.

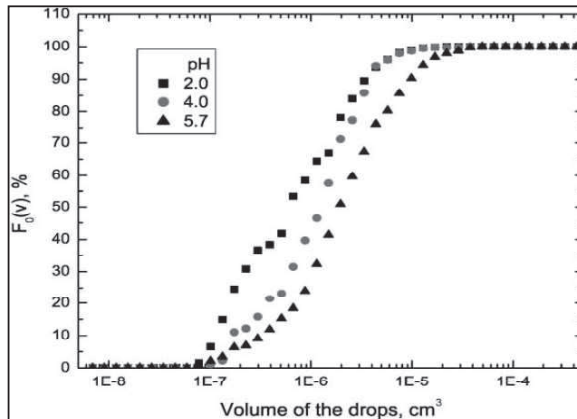


Figura 15: Efecto del pH en la distribución de tamaño de gotas (Ruiz et al.,2002)

El eje de la abscisa corresponde al volumen de gotas y la ordenada al porcentaje acumulado de la distribución de tamaño, las condiciones de esta prueba fue a una temperatura de 22°C, agitación de 300 rpm durante 30 minutos, la fase acuosa con 0,25 M de Na₂SO₄.

2.4.2.4. Efecto de la temperatura en el tamaño de gota

Al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad de la fase dispersa y la tensión interfacial del sistema, lo que redonda en una disminución en la coalescencia de las gotas (Ruiz et al., 2002). La Figura 16 muestra el efecto de la temperatura en la distribución del tamaño de gotas.

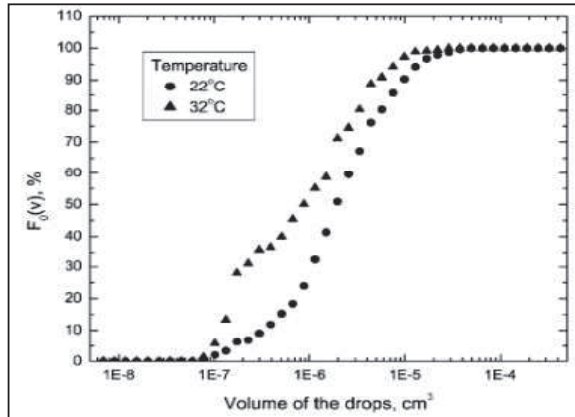


Figura 16: Efecto de la temperatura en la distribución de tamaño de gotas (Ruiz et al.,2002)

El eje de la abscisa corresponde al volumen de gotas y la ordenada al porcentaje acumulado de la distribución de tamaño, las condiciones de esta prueba fue una agitación de 300 rpm durante 30 minutos, la fase acuosa con 0,25 M de Na₂SO₄ y pH 5,7.

2.5. Métodos multivariable

El método multivariable es un método estadístico utilizado para determinar la contribución de varios factores en un simple evento o resultado. Los procedimientos multivariados constituyen un conjunto de técnicas de amplia aplicación en el mundo científico, especialmente en los estudios de tipo empírico.

Se entiende por variable alguna magnitud que representa las características de los elementos objeto de investigación que tratamos de medir, estas se pueden clasificar en dos grupos, variables dependientes (VD) y variables independientes (VI).

Las variables dependientes son aquellas cuyo comportamiento es explicado o pronosticado por una o más variables independientes. Las variables dependientes también se denominan variables criterio o respuesta, mientras que las variables independientes son las que servirán para explicar el fenómeno estudiado y en ocasiones se denominan como variables explicativas, factores o variables predictoras (Montgomery.,2004).

2.5.1 Métodos dependientes

De acuerdo al objetivo que se requiera, este tipo de métodos entrega diferentes herramientas que se presentan a continuación.

- Regresión múltiple: estudia la dependencia de una variable frente a otras variables.

- Análisis discriminante: se busca una función lineal de varias variables que permita clasificar nuevas observaciones que se presentan.
- Métodos log-lineales y logit: se predicen números de apariciones en casillas (re cuentas) en función de otras casillas. Se utilizan variables categóricas.
- Análisis de correlación canónica: se toma un grupo de variables y se trata de predecir sus valores en función de otro grupo de variables.
- Análisis multivariable de la varianza: se descompone la variabilidad en una medida de un conjunto de variables cuantitativas en función de otras variables categóricas.

2.5.2 Métodos independientes

Los métodos independientes nos entregan diferentes tipos de herramientas las cuales son descritas a continuación.

- Análisis de componentes principales: se tiene n variables cuantitativas y se mezclan mediante combinaciones lineales reduciéndose las variables que resumen la información para facilitar la interpretación.
- Análisis factorial: similar al anterior aunque sólo se fija en explicar términos de factores ocultos a las variables originales, no tanto en reducir el número de variables.

- Multidimensional de escala: busca mapas de los objetos, situándolos según una serie de métricas.
- Análisis de correspondencias: es parecido al análisis factorial, pero con variables categóricas⁷ exclusivamente.
- Análisis de grupos: trata de investigar grupos naturales entre las observaciones según sus valores medidos por las variables.

2.6. Diseño de experimento

Para aplicar el enfoque estadístico en un diseño y análisis de experimento, es necesario tener claro qué es exactamente lo que se va a estudiar, cómo se van a coleccionar los datos y al menos una comprensión cualitativa de la forma en que van a analizarse los datos, para ello se recomienda seguir los siguientes pasos (Montgomery.,2004).

- Identificación y exposición del problema
- Elección de los factores, los niveles y rangos
- Selección de la variable de respuesta
- Elección del diseño experimental

⁷ Son las variables cuyos valores son del tipo categórico, es decir, que indican categorías o son etiquetas alfanuméricas o “nombre”.

- Realización del experimento
- Análisis estadístico de los datos
- Conclusiones y recomendaciones

2.6.1. Diseño factorial

En muchos experimentos interviene el estudio de los efectos de dos o más factores. En general, los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos. Un diseño factorial es aquél en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo.

El más importante de los casos de los diseños factoriales es el que tiene k factores cada uno a dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos, valores de temperatura o presión, o pueden ser cualitativos, tales como 2 máquinas o dos operadores, o tal vez pueda ser la presencia o ausencia de un factor. Una réplica completa de tal diseño requiere $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se conoce como un diseño factorial 2^k (Kuehl.,2001).

Como cada factor en el experimento tiene 2 niveles, los llamaremos nivel bajo (-) y nivel alto (+). El diseño más pequeño en este tipo de experimento es el que tiene $k = 2$ factores. Es importante realizar réplicas de cada tratamiento o combinación en el experimento ya que esto permite comparar entre valores (datos obtenidos en los diferentes niveles de un factor fijando los demás factores) y dentro de valores (datos obtenidos de una misma combinación) (Kuehl.,2001).

Las observaciones de un experimento factorial pueden describirse con un modelo. Hay varias formas de escribir el modelo de un experimento factorial.

2.6.1.1. Modelo de medias

El modelo de medias en su forma general es:

$$Y_{ijk} = \mu + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad 2.2$$

Donde las medias de la celda ij-ésima es:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad 2.3$$

Donde μ es el efecto promedio global, τ_i es el efecto del nivel i-ésimo del factor A de los renglones, β_j es el efecto del nivel j-ésimo del factor B de las columnas, $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre τ_i y β_j y ε_{ijk} es un componente de error aleatorio (Montgomery.,2004).

2.6.1.2. Modelo de regresión

El modelo de regresión en su forma general es:

$$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots \dots \dots + \beta_k * X_k \quad 2.4$$

Donde k es la variable independiente y a los parámetros β_k se les llama coeficiente de regresión (Montgomery.,2004).

2.6.2. Implementación del modelo

La implementación del modelo de medias, se rige por el cumplimiento del planteamiento de la hipótesis y comprobación de la hipótesis básica mediante el análisis de los residuos., (Montgomery.,2004).

2.6.2.1. Planteamiento de hipótesis

La elaboración del modelo de medias $Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$ considera las siguientes hipótesis:

<i>Hipotesis Nula</i> (τ)	$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_n$	2.5
<i>Hipotesis Alternativa</i> (τ)	H_1 : Alguna diferencia existe	2.6
<i>Hipotesis Nula</i> (β)	$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_n$	2.7
<i>Hipotesis Alternativa</i> (β)	H_1 : Alguna diferencia existe	2.8
<i>Hipotesis Nula</i> ($\tau\beta$)	$H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0$ para todo ij	2.9
<i>Hipotesis Alternativa</i> ($\tau\beta$)	H_1 : Al menos una $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$	2.10

2.6.2.2. Comprobación de las hipótesis mediante el análisis de los residuos

Se debe comprobar la hipótesis básica de los residuos, ya que en caso que no se cumplan, significa que el modelo no es válido. Las hipótesis básicas de los residuos son:

- Son independientes
- Idénticamente distribuidos normalmente
- Media cero y varianza constante

Para verificar si cumplen con las condiciones anteriores es necesario examinar las gráficas de los residuos, tales como la grafica de probabilidad normal, histograma, variabilidad y aleatoriedad (Montgomery.,2004).

En la zona superior izquierda de la Figura 17 se observa el gráfico de la distribución normal, los datos de los residuos son ubicados en el eje de las abscisas y el porcentaje en el de las ordenadas. Si sus puntos están o siguen esta línea, quiere decir que los residuos tienen este tipo de distribución (Minitab.,2007).

Los histogramas de los residuos permiten obtener de ellos, la asimetría respecto a la media. En la Figura 17, lado inferior izquierdo se presenta un histograma de residuos (Minitab.,2007).

La gráfica de variabilidad es útil para evaluar si existe una varianza constante entre ellos. (Figura 17, superior derecha). Deben estar distribuidos de manera aleatoria alrededor de la recta que pasa por cero. Si estos presentan curvatura, indica que es necesario un término de orden más alto. Los puntos alejados de cero indican valores atípicos y los alejados en la dirección del eje x, son puntos influyentes (Minitab.,2007).

Los residuos deben fluctuar en un patrón aleatorio alrededor de la línea central, como se observa en la zona inferior derecha de la Figura 17, en caso que siguiese una tendencia indicaría una manipulación de los datos (Minitab.,2007).

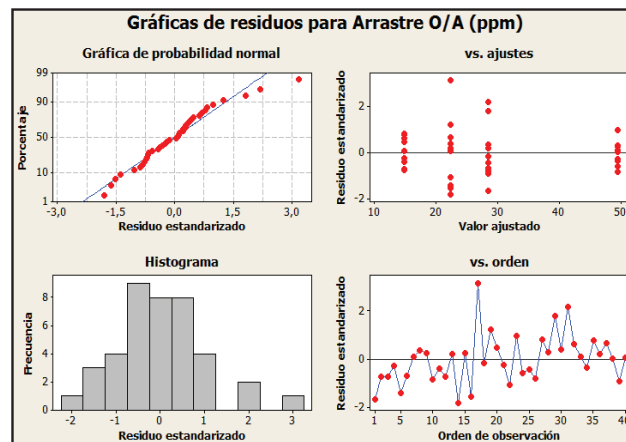


Figura 17: Ejemplo de gráficos de residuos (Minitab.,2007)

2.7. Análisis de varianza (ANOVA)

El objetivo principal de muchos experimentos consiste en determinar el efecto que sobre alguna variable dependiente Y tienen distintos niveles de algún factor X.

Esencialmente, el diseño para el análisis simple de la varianza consistirá en obtener muestras aleatorias e independientes del valor de Y asociado a cada uno de los distintos niveles del factor X_1, X_2, \dots, X_n entonces podremos determinar si los diferentes niveles del factor tienen un efecto significativo sobre el valor de la variable dependiente (Montgomery.,2004).

De forma similar a lo que ocurre con la regresión lineal y/o modelo de medias, aquí también hay un modelo para los datos. El modelo asociado al i-ésimo nivel del factor X es:

$$Y_{ijk} = \mu + \varepsilon_{ijk}$$

La elaboración de este modelo parte de un supuesto de normalidad que considera tres condiciones, para establecer la hipótesis básica, estas son que los residuos son independientes, idénticamente distribuidos normalmente y presentan media cero y varianza constante.

La hipótesis plantea una hipótesis nula y otra alternativa tal como se muestra en la Ecuación 2.11 y Ecuación 2.12 respectivamente.

$$\text{Hipotesis Nula} \quad H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_n \quad 2.11$$

$$\text{Hipotesis Alternativa} \quad \text{Existe alguna diferencia} \quad 2.12$$

En estadística, se utiliza comúnmente el pvalor o también conocido como estadístico p para el rechazo o no rechazo de la hipótesis nula. El valor p está definido como la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que realmente se ha obtenido, suponiendo que la hipótesis nula es cierta.

La hipótesis nula se rechaza si el valor p asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significación establecido, convencionalmente 0,05 ó 0,01, punto que se llama potencia del contraste. Si el valor p es inferior a la potencia del contraste nos indica que lo más probable es que la hipótesis de nula sea falsa. Sin embargo, también es posible que estemos ante una observación atípica, por lo que estaríamos cometiendo el error estadístico de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es cierta basándonos en que hemos tenido la mala suerte de encontrar una observación atípica. Este tipo de errores se puede subsanar rebajando el valor p; un valor p de 0,05 que es usado en investigaciones habituales

Existen otros números estadísticos que permiten establecer si los valores experimentales se acoplan al modelo seleccionado, esto es utilizando el estadístico R^2 y estadístico R^2_{ajustado} , se recomienda hacer el análisis a partir del resultado del R^2_{ajustado} ya que este considera una corrección, eliminando el efecto del aumento del número de variables.

Para verificar estos supuestos suele ser útil realizar un gráfico que muestre la distribución de las observaciones por niveles. La Figura 18 muestra el resultado de un análisis ANOVA en el software minitab.

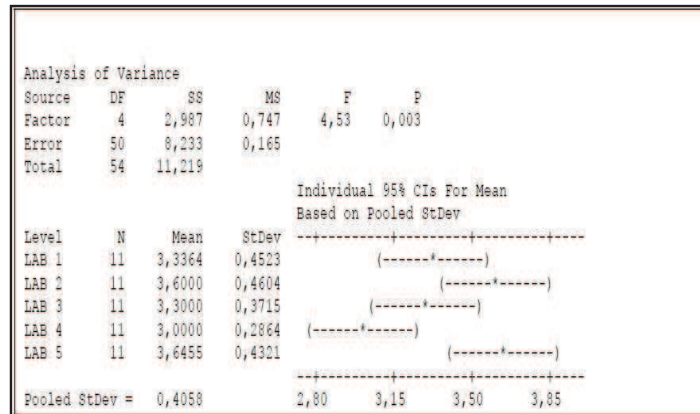


Figura 18: Ejemplo de un análisis ANOVA (Minitab.,2007)

En la zona inferior derecha de la Figura 18 se observan los factores que son analizados sobre una respuesta Y para saber su efecto sobre esta última, además, en la zona inferior derecha aparecen los resultados de manera grafica. Finalmente en la zona superior aparece una tabla con resultados estadísticos, tales como p-valor, estadístico F, grados de libertad y suma de los cuadrados (Minitab.,2007).

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de las pruebas se prepara una solución sintética rica en cobre (PLS) y una solución orgánica con diferentes concentraciones de extractante, tanto la solución orgánica como la acuosa son caracterizados, midiendo la densidad, viscosidad y tensión interfacial, bajo diferentes condiciones tales como temperatura, agitación y pH.

Para determinar el arrastre O/A se utilizan dos metodologías de laboratorio, la primera es a través de una celda piloto de extracción y la segunda usando un reactor con temperatura y agitación controlada. En el caso de esta última, el número de pruebas a evaluar, se define utilizando un diseño factorial.

Las evaluaciones se realizan en el laboratorio de hidrometalurgia de la UCN, cumpliendo las normas de seguridad que rige en la Universidad y las recomendadas por los fabricantes de los extractantes y solventes.

3.1. Preparación del PLS y orgánico

3.1.1. PLS

Se prepara una solución sintética de PLS de 6 g/L a pH de 1,6 y 2,0, el cual es almacenado en bidones de 60 L tal como se observa en la Figura 19.



Figura 19: Bidones de almacenamiento de PLS

3.1.2. Orgánico

Ocho muestras de orgánico son preparadas con concentraciones de extractante de 10, 15 y 20% v/v, los reactivos a usar que se muestran en la Tabla 5 se clasifican de acuerdo al tipo de oxima, tales como aldoximas + modificador, aldoximas, mezclas y cetoximas.

Tabla 5: Concentración de extractante de los reactivos a utilizar en las pruebas

Oxima	Reactivo	Concentración de extractante		
Aldoxima + Mod.	Acorga 5640	10	15	20
Aldoxima + Mod.	Lix 612 NLV	10	15	20
Aldoxima	Lix 860 NI	10	15	20
Aldoxima	Lix 860 I	10	15	20
Mezcla	Lix9790N	10	15	20
Mezcla	Lix 984N	10	15	20
Cetoxima	Lix 84 I	10	15	20
Cetoxima	Lix 8180	10	15	20

Los ocho reactivos se evalúan a las concentraciones ya mencionadas disueltos en solvente Conosol 170 ES y Orfom SX 12 para las pruebas en celda piloto y reactor, respectivamente. En Figura 20, se muestra el almacenamiento del orgánico.



Figura 20: Bidones de almacenamiento de orgánico

3.2. Caracterización de las soluciones orgánicas y acuosa

La caracterización de las soluciones consiste en medir la densidad, viscosidad y tensión interfacial, tanto para el orgánico como para el PLS, estas se realizan a dos temperaturas: 10 y 20°C.

3.2.1. Densidad

La medición de densidad se realiza utilizando dos metodologías, la primera empleando un densímetro como se observa en la Figura 21 y la segunda aplicando la técnica de la picnometría.

La medición de densidad utilizando el densímetro se realiza siguiendo los siguientes pasos.

- Medir la densidad del orgánico con la técnica peso-volumen, para posteriormente determinar el rango del densímetro a utilizar.

- Para medir la densidad de una solución de orgánico, se debe seleccionar un densímetro que varíe entre 0,8 a 0,9 g/mL y para el acuosos entre 1,0 a 1,2 g/mL
- La solución que se desea medir debe ser ingresada a una probeta, el volumen mínimo de 500 mL.
- Una vez tenido el volumen en la probeta, se ingresa el densímetro en la solución, la zona más pesada del densímetro debe ir hacia abajo.
- Se deja el densímetro sobre la solución unos 30 segundos aproximadamente hasta que logre el equilibrio el equipo en el fluido y se procede a tomar la medición.
- Por último, el valor de la medición se lee en donde indica la superficie del líquido con el rótulo del densímetro.

La medición de la densidad utilizando la técnica de la picnometría es usada para comparar los resultados obtenidos del densímetro para la solución orgánica. Los valores obtenidos se ingresan a Ecuación 3.1.

$$Densidad\ orgánico = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_3 - P_1)} \quad 3.1$$

Donde, (P_1) es el peso de un picnómetro seco limpio y tapado, luego es llenado con orgánico y pesado con el tapón (P_2), enseguida es ambientado a la temperatura que se desea medir durante 40 minutos. Finalmente se repite la operación remplazando el orgánico por agua destilada (P_3).



Figura 21: Medición de densidad

3.2.2. Viscosidad

La viscosidad se mide usando un viscosímetro de caída de bola Gilmont, tal como se muestra en la Figura 22.

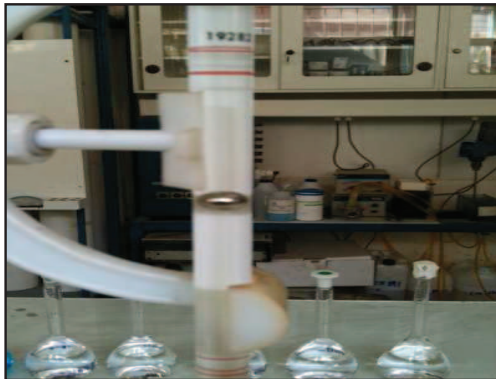


Figura 22: Medición de viscosidad

Para medir la viscosidad se debe seguir el siguiente procedimiento.

- Se debe retirar las tapas superiores de control, de manera que quede abierto el tubo. Una vez el tubo abierto, se debe ingresar la solución que se desea medir, el tubo debe ser llenado con 10 mL.
- Posteriormente, se debe ingresar la bolita y colocar las tapas superiores, a medida que se vayan situando y apretando existirá un rebalse de fluido por la parte superior del viscosímetro.
- Una vez realizados los puntos anteriores, se deja caer la bolita a través del tubo, cuando la bolita llega a la zona inferior, el tubo es girando en 180 grados y se comienza a tomar el tiempo en que la bolita pasa entre las marcas del viscosímetro.
- Para determinar la viscosidad, se ingresan los valores a la Ecuación 3.2.

$$\mu = K * (\rho_f - \rho) * t \quad 3.2$$

Donde:

μ = Viscosidad (cp)

K= Constante del viscosímetro

ρ_f = Densidad de la bolita (g/mL)

ρ = Densidad del liquido (g/mL)

t = Tiempo (min)

Valores de K

Tamaño de bolita 1	Tamaño de bolita 2	Tamaño de bolita 3
0,3	3,3	35

Valores de ρ_f

Vidrio	Acero inoxidable	Tántalo
2,53	8,05	16,6

3.2.3. Tensión interfacial

La tensión interfacial se mide usando el tensiómetro de Dunouy, como se muestra en la figura 9.



Figura 23: Tensiómetro de Dunouy

A continuación se detalla el procedimiento:

- Se acondiciona la muestra del reactivo orgánico y solución acuosa.
- Se engancha el anillo limpio en el brazo del tensiómetro.
- Se coloca una muestra de solución acuosa con concentración conocida en el vaso precipitado limpio y se posiciona en la mesa de muestra.
- Se levanta la mesa hasta que el anillo esté sumergido aproximadamente 5 a 7 mm en el acuoso.
- Cuidadosamente se adiciona el reactivo orgánico en la superficie del acuoso con una altura de 5 a 10 mm.
- Se ajusta la posición hasta que el anillo se encuentre en la interfase y la palanca del brazo se encuentre en posición neutral.
- Al mismo tiempo, aumentar la torsión del anillo y bajar la mesa de la muestra hasta que se produzca el quiebre del film.
- Para determinar la tensión interfacial real, se ingresan los valores a la Ecuación 3.3, esta última es suministrado por el manual de operación del tensiómetro Fisher.

$$F = 0,7250 + \sqrt{\frac{0,01452 * P}{C^2 * (D-d)}} + 0,04534 - 1,679 * \frac{r}{R} \quad 3.3$$

Donde:

F= Tensión interfacial corregida (dina/cm)

R= Radio del anillo (cm)

r= radio del alambre del anillo (cm)

P = Valor de la tensión interfacial observada (cm/dina)

D = Densidad del liquido menos denso (g/mL)

d = Densidad del liquido más denso (g/mL)

C = Circunferencia del anillo (cm)

3.3. Parámetros operacionales para las pruebas

3.3.1. Celda piloto de extracción

En la Tabla 6 se muestran los parámetros operacionales de la celda piloto, en estas pruebas solo existe variación del pH del PLS.

Tabla 6: Parámetros operacionales celda de extracción

Parámetros	
Concentración Cu PLS sintético (g/L)	6,0
Diluyente	Conosol 170 ES
Agitación (rpm)	700
pH	1,6 – 2,0
Continuidad	Acuosa
O/A	1:1
Flujo de Orgánico/Acuoso (mL/min)	50

3.3.2. Reactor con control de agitación y temperatura

La Tabla 7 muestra los parámetros operacionales para las pruebas en el reactor,

Tabla 7: Parámetros operacionales de pruebas en reactor

Parámetros	
Concentración Cu PLS sintético (g/L)	6,0
Diluyente	Orfom SX 12
Agitación (rpm)	500 – 700
pH	1,6 – 2,0
Continuidad	Acuosa
O/A	1:1
Temperatura	10°C – 20°C
Volumen de orgánico (mL)	400
Volumen de acuoso (mL)	400

3.4. Procedimientos para las pruebas

3.4.1. Celda de extracción

Antes de realizar cada prueba, la celda es lavada y secada para evitar cualquier contaminación de reactivos remanentes de pruebas anteriores, para ello se utiliza un solvente (acetona). A continuación se detalla el procedimiento a seguir:

- El equipo se ubica en un lugar seguro y firme, y se conecta a la fuente de poder el agitador y las bombas (una de PLS y la otra de orgánico), ambas bombas son peristálticas.
- Se fijan los parámetros de operación, establecidos en la Tabla 6.

- Antes de encender las bombas, el decantador y el mezclador son llenados hasta la mitad con solución acuosa, para mantener la continuidad.
- Se inicia el proceso de llenado de la celda con PLS y orgánico poniendo en funcionamiento las bombas, cuidando que ingrese de manera simultánea y en la razón deseada.
- El aspa del agitador seleccionado para las pruebas se observa en la Figura 24, este tipo de aspa es utilizado comúnmente en la industria.



Figura 24: Aspa del agitador en celda de extracción

- Una vez que se inicia el llenado de la celda, se activa el agitador a 700 rpm, para lograr mezclar las soluciones, además, la continuidad y la razón O/A se mide con una probeta de 10 mL que se ingresada al mezclador con una inclinación de 90°, luego es retirada y se inicia la observación de la separación de las fases como se aprecia en la Figura 25.

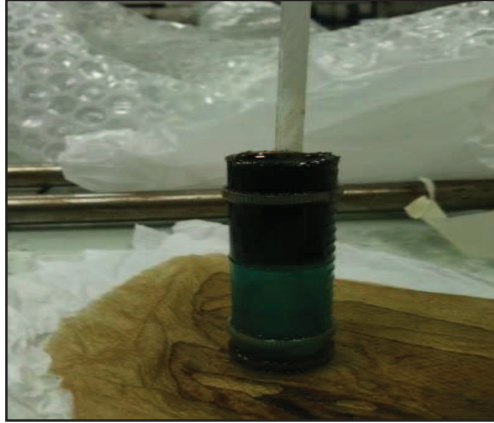


Figura 25: Probeta para medir continuidad y razón O/A

- Cuando la celda piloto es estabilizada se procede a la toma de muestra para análisis de arrastre.
- La toma de muestra se realiza una vez cumplido todos los puntos antes mencionados. La toma de muestra se realiza con un matraz de Erlenmeyer de 500 mL bajo la salida de refino.

3.4.2. Reactor con control de agitación y temperatura

Las pruebas se realizan en un reactor anetich de 1 litro, el cual es conectado a un baño termostático, como se observa en la Figura 26.

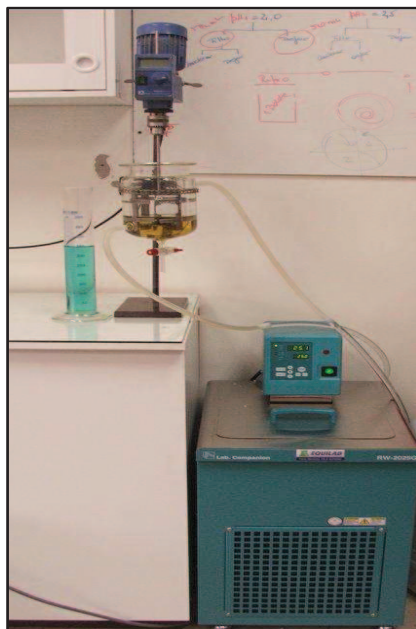


Figura 26: Esquema reactor con control de temperatura

Las variables a modificar son el pH del acuoso, concentración del extractante, agitación y temperatura.

A continuación se detalla el procedimiento a seguir.

- El equipo se ubica en un lugar seguro y firme, y se conecta a la fuente de poder del agitador y el baño termostático.
- Se inicia el proceso de llenado del reactor vertiendo con 400 mL de PLS y posteriormente 400 mL de orgánico, el orden se debe a la continuidad que se desea.

- Una vez que se inicia el llenado el reactor, se activa el agitador para lograr mezclar las soluciones con el baño termostático en funcionamiento a la temperatura deseada.
- El tiempo de agitación es de 3 minutos, el criterio utilizado se basa en que en ese tiempo se logra cargar sobre el 95% del orgánico.
- Una vez detenida la agitación se espera que se logre la separación de las fases (5 minutos), para extraer una muestra para el análisis de arrastre.
- La toma de muestra de refino para el análisis de arrastre se realiza desde la zona superior del reactor, para ello se utiliza una pipeta encamisada y protegida en la zona inferior, para evitar que la punta se contamine con orgánico, como se aprecia en la Figura 27.



Figura 27: Pipeta para toma de muestra desde reactor

- Una vez introducida la pipeta en la zona acuosa se toma una muestra de 200 mL. usando una jeringa de vidrio, como se aprecia en la Figura 28.



Figura 28: Jeringa adherida a la pipeta para toma de muestra desde reactor

3.5. Diseño de experimento

Se planifica a través de un diseño factorial 2^k hacer las pruebas en el reactor, ya que se está interesado en investigar las asociaciones que se presentan entre variables, además de hacer un análisis factorial que permita desarrollar un modelo de medias de los arrastres O/A.

3.5.1. Diseño factorial 2^k para las pruebas

La ventaja que presenta este diseño es que requiere relativamente pocas pruebas por factor estudiando, este establece niveles máximos y mínimos de las variables a evaluar como se observa en Tabla 8, los niveles del pH corresponden a 1,6 y 2,0; la agitación a 500 y 700 rpm; y la temperatura a los 10 y 20°C, todas las pruebas se realizan en continuidad acuosa y para concentraciones de extractante de 10, 15 y 20%.

Tabla 8: Factores de diseño experimental mínimo y máximo

Variable	Nivel mínimo	Nivel máximo
Agitación	-1	1
Temperatura	-1	1
pH	-1	1

El diseño a utilizar es el 2^k , presenta 3 factores con replicas con un total de 40 pruebas, como se aprecia en la Tabla 9 y Tabla 10. El diseño y análisis factorial se realiza usando el software estadístico Minitab.

Tabla 9: Diseño factorial 2^k

OrdenEst	OrdenCorrida	Agitación rpm	pH	Temperatura °C
35	1	500	2,0	10
37	2	500	1,6	20
14	3	700	1,6	10
30	4	700	1,6	10
9	5	500	1,6	20
27	6	500	2,0	10
10	7	700	1,6	10
2	8	700	1,6	10
36	9	700	2,0	20
7	10	500	2,0	10
3	11	500	2,0	10
31	12	500	2,0	10
18	13	700	1,6	10
12	14	700	2,0	20
21	15	500	1,6	20
19	16	500	2,0	10
33	17	500	1,6	20
26	18	700	1,6	10
16	19	700	2,0	20
23	20	500	2,0	10
4	21	700	2,0	20
15	22	500	2,0	10

Tabla 10: Diseño factorial 2^k(continuación)

OrdenEst	OrdenCorrida	Agitación rpm	pH	Temperatura °C
15	22	500	2,0	10
38	23	700	1,6	10
22	24	700	1,6	10
39	25	500	2,0	10
40	26	700	2,0	20
1	27	500	1,6	20
28	28	700	2,0	20
29	29	500	1,6	20
6	30	700	1,6	10
32	31	700	2,0	20
8	32	700	2,0	20
5	33	500	1,6	20
17	34	500	1,6	20
13	35	500	1,6	20
34	36	700	1,6	10
20	37	700	2,0	20
24	38	700	2,0	20
11	39	500	2,0	10
25	40	500	1,6	20

3.6. Características de celda piloto de extracción

Para las pruebas de celda piloto, se usa una de acrílico con capacidad de 100 mL/min, que consta de una entrada con dos bocas, una para el PLS y la otra para el orgánico, ambas soluciones son bombeadas a la celda a través de una bomba peristáltica, donde ingresan al mezclador, la mezcla orgánico/acuoso rebalsa al decantador donde se produce la separación a la etapa de separación, esta separación ocurren en el decantador, aquí las fases se separan por diferencias de densidad, obteniéndose a la salida del decantador dos flujos uno de orgánico cargado y otro de refino.

La disposición de las bombas se muestra en la Figura 29.



Figura 29: Bombas de la celda de extracción

3.7. Análisis de arrastre de orgánico en acuoso

El análisis de arrastre se realiza aplicando el concepto de carga máxima, a continuación de detalla el procedimiento.

- Una vez tomada la muestra desde la celda y/o desde el reactor, se almacena en frascos como se aprecia en la Figura 30.

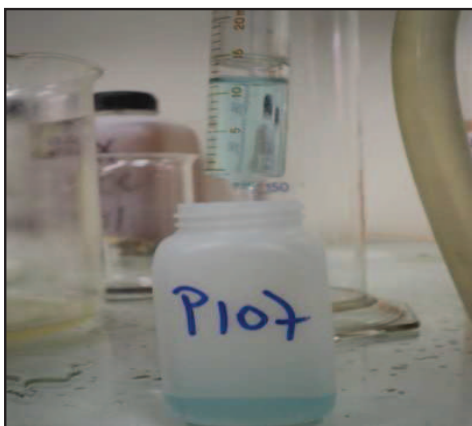


Figura 30: Frasco para almacenar las muestras

- El volumen de refino almacenado es medido y anotado ya que es importante para el cálculo final de arrastre O/A, posteriormente se le adiciona 20 mL de solvente y es agitado por 3 minutos, como se observa en la Figura 31



Figura 31: Agitación de refino con solvente

- Una vez terminada la agitación, se espera que ambas fases se separen por densidad, quedando el solvente en la zona superior y el acuoso en la parte inferior del embudo, posteriormente se procede a vaciar el refino del embudo.
- Los 20 mL de solvente es mezclado con PLS, en razón 1:3, es decir, 1mL de solvente cada 3 mL de PLS, este último tiene una concentración de 6 g/L de cobre y 1,2 de fierro a un pH 2,0.
- El solvente es contactado con PLS, agitado y se vacía el refino 3 veces, el solvente que queda es filtrado con papel 1PS, y almacenado en tubos de ensayo.

- Finalmente el solvente con el orgánico arrastrado es medido en absorción atómica.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados de las caracterizaciones

4.2.1. Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad

A continuación, se muestra el efecto que tiene la concentración de extractante y temperatura en la densidad del orgánico.

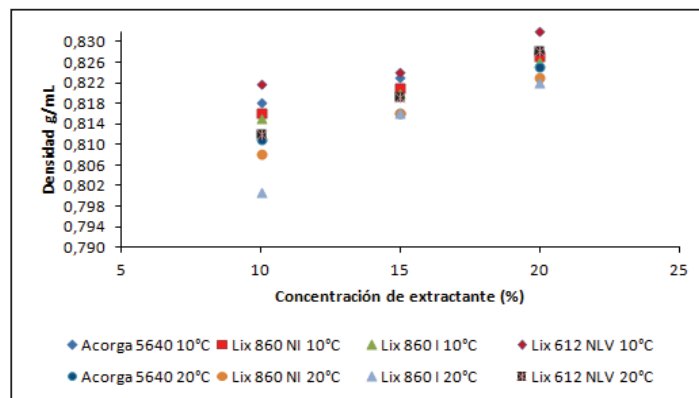


Figura 32: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad de las aldoximas

En la Figura 32, se observa la variación de la densidad respecto a la concentración de extractante y la temperatura para las aldoximas, en este las aldoximas modificadas tales como el Acorga 5640 y Lix 612NLV presentan los niveles más altos de densidad tanto a 10° y 20°C respecto a las aldoximas puras como el Lix 860 NI y Lix 860 I, además, se infiere que la concentración de extractante es proporcional a la densidad, es decir, a medida que aumenta la concentración de extractante aumenta la densidad, los anexos A.1 y A.2 muestra la tabla con los resultados de la Figura 32.

En la Figura 33, se observa la variación de la densidad respecto a la concentración de extractante y la temperatura para las cetoximas, en este caso el Lix 8180 muestra una densidad mayor que el Lix 84 I, esta situación se debe a que el Lix 8180 es una cetoxima con una alta viscosidad como se ve en la Figura 36. Al aumentar la temperatura decrece la densidad para ambos reactivos. Cuando se incrementa la concentración de extractante hasta el 20% la variación de la densidad de ambos reactivos a 10°C y 20°C es menor que a una concentración de extractante de 10% y 15%, en los anexos A.1 y A.2 se observan las tablas con resultados de la Figura 33.

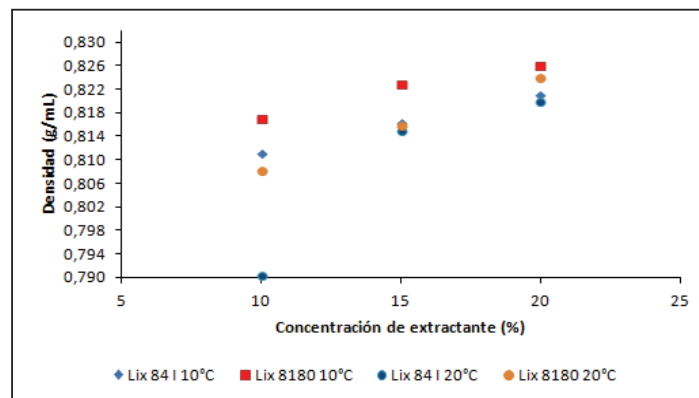


Figura 33: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad de las cetoximas

En la Figura 34, se muestra la variación de la densidad respecto a la concentración de extractante y la temperatura para las mezclas, se observa que al comparar el Lix 984 N y Lix 9790 N con una concentración de extractante del 10% existe una diferencia mayor al variar la temperatura de 10°C a 20°C que al comparar ambos reactivos al 15% de extractante, esto se puede deber a que el Lix 984 N es más sensible a la temperatura que el Lix 9790N tal como muestra el diagrama de Pareto de la Figura 95, y probablemente se acentúa a baja concentración de extractante.

A partir del 15% de extractante se mantienen los valores de densidad menos dispersos al modificar la temperatura entre 10°C y 20°C. El Lix 9790N presenta niveles menores de densidad respecto al Lix 984N, en los anexos A.1 y A.2 se observan las tablas con resultados de la Figura 34.

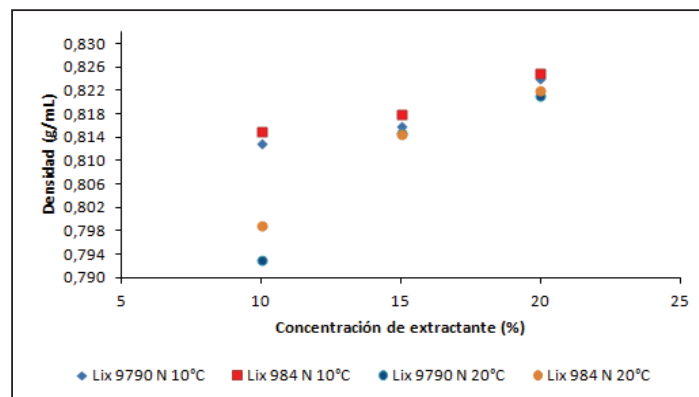


Figura 34: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la densidad de las mezclas

Las Figura 32, Figura 33 y Figura 34, muestran que la densidad es mayor para aquellos reactivos que son aldoximas, principalmente los que tiene modificador y el menor es el Lix 84 I que es una cetoxima, además, se observa que al aumentar la temperatura disminuyen las densidades, esto se debe a que al aumentar la temperatura también aumenta el volumen, es lo que se denomina dilatación, y está dada por la ecuación densidad = masa / volumen entonces a medida que la temperatura aumenta, el volumen también aumenta y por tanto la densidad disminuye. Al aumentar la concentración del 15% al 20% de extractante los valores de densidad están menos dispersos para todos los reactivos entre 10°C y 20°C.

4.2.2. Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad

A continuación, se muestra el efecto que tiene la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad del orgánico.

En la Figura 35, se observa la variación de la viscosidad respecto a la concentración de extractante y la temperatura para las aldoximas, la viscosidad tiene el mismo comportamiento que la densidad, esto se debe a que la densidad es función de la viscosidad, es decir, al disminuir la densidad disminuirá la viscosidad. Las aldoximas modificadas tales como el Acorga 5640 y Lix 612NLV presentan los niveles más altos de viscosidad llegando a los 3,50 cp al 20% de extractante y 10°C. Los anexos A.1 y A.2 muestran las tablas con resultados de la Figura 35.

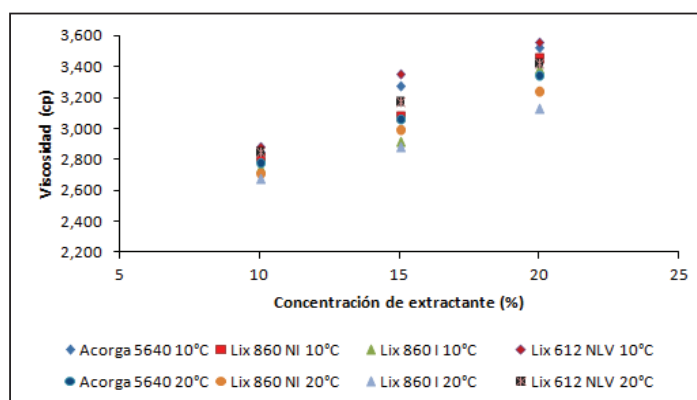


Figura 35: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad de las aldoximas

En la Figura 36, se observa la variación de la viscosidad respecto a la concentración de extractante y la temperatura para las cetoximas, Al igual que en el caso de la densidad, el Lix 8180 presenta el nivel más alto de viscosidad respecto a la otra cetoxima evaluada, bajo cualquier condición, a medida que la temperatura se incrementa la viscosidad tiende a disminuir, en cambio al incrementar la concentración de extractante se incrementa la viscosidad, en los anexos A.1 y A.2 se observan las tablas con resultados de la Figura 36.

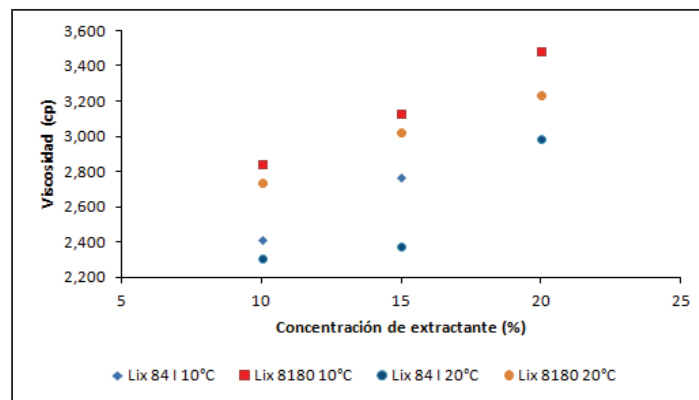


Figura 36: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad de las cetoximas

En la Figura 37, se observa la variación de la viscosidad respecto a la concentración de extractante y la temperatura para las mezclas, en este caso el Lix 984 N presenta el nivel más alto de viscosidad, no existe una variación importante entre 10° y 20°C en la viscosidad para este reactivo, tal como se muestra en los anexos A.1 y A.2.

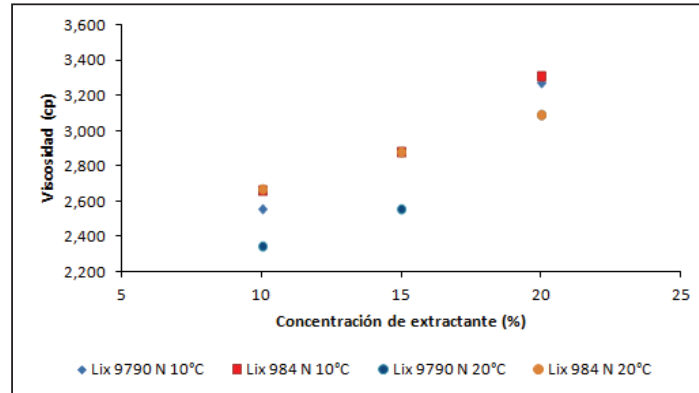


Figura 37: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la viscosidad de las mezclas

Las Figura 35 Figura 36 y Figura 37, muestran que al igual que la densidad la viscosidad es mayor para aquellos reactivos que son aldoximas, principalmente los que tienen modificador y el menor es el Lix 84 I que es una cetoxima, además, se observa que en las mezclas la dispersión de los resultados de viscosidad al variar la temperatura entre 10°C y 20°C es menor que en el caso de la aldoxima y cetoxima.

4.2.3. Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial a pH 1,6 y pH 2,0

A continuación, se muestra el efecto que tiene la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial a pH 1,6 y pH 2,0.

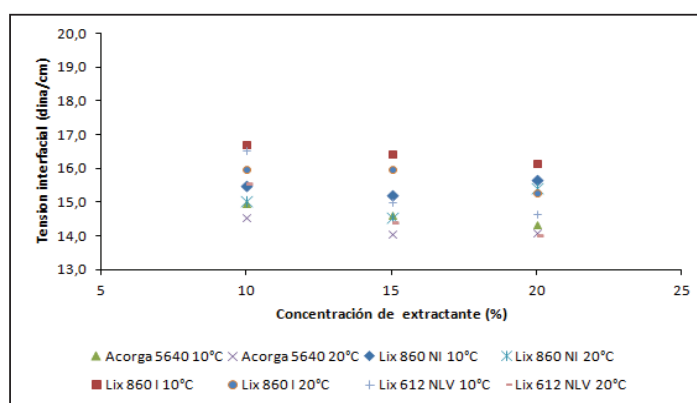


Figura 38: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las aldoximas a pH 1,6

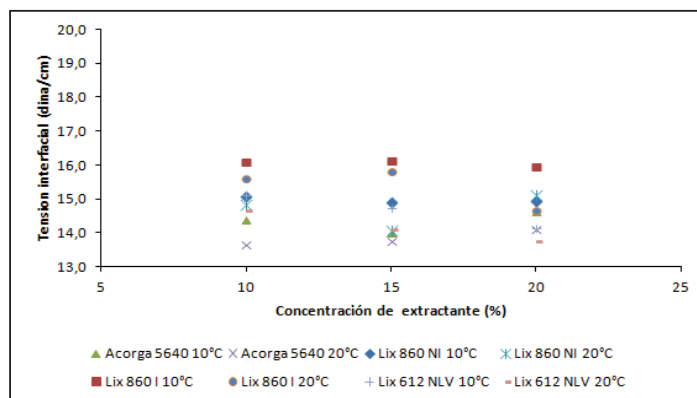


Figura 39: Efecto la de concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las aldoximas a pH 2,0

Las Figura 38 y Figura 39, muestran la variación de la tensión interfacial al modificar la temperatura y concentración de extractante para las aldoximas, se observa una disminución de la tensión a medida que aumenta la concentración del extractante y la temperatura, las aldoximas modificadas presentan los niveles más bajos de tensión para las distintas temperaturas, la tabla de resultado se muestran en los anexos B.1, B.2 y B.3.

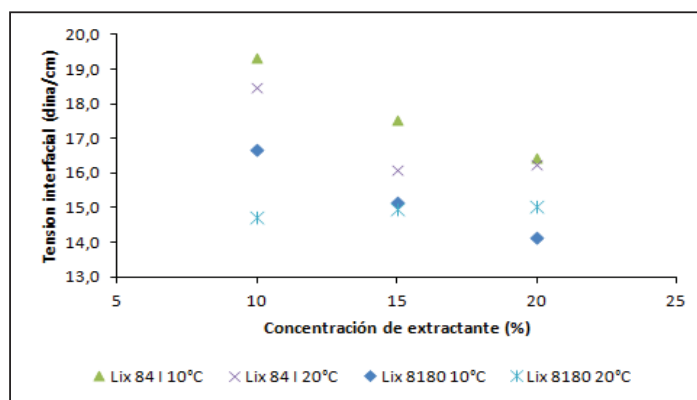


Figura 40: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial en las cetoximas a pH 1,6

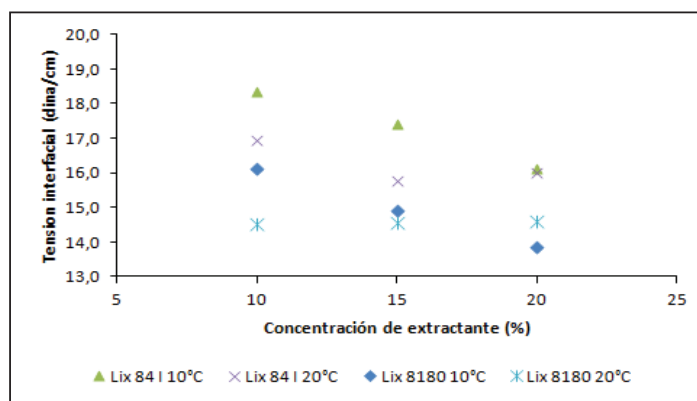


Figura 41: Efecto la de concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las cetoxima a pH 2,0

Las Figura 40 y Figura 41, muestran la variación de la tensión interfacial al modificar la temperatura y concentración de extractante para las cetoximas, ocurre el mismo fenómeno que para las aldoximas, aunque en este caso el Lix 8180 presenta valores anómalos ya que aumenta la tensión a 10°C y 20°C al cambiar de 10% al 15% de extractante, la tabla con los resultados se observa en los anexos B.1, B.2 y B.3.

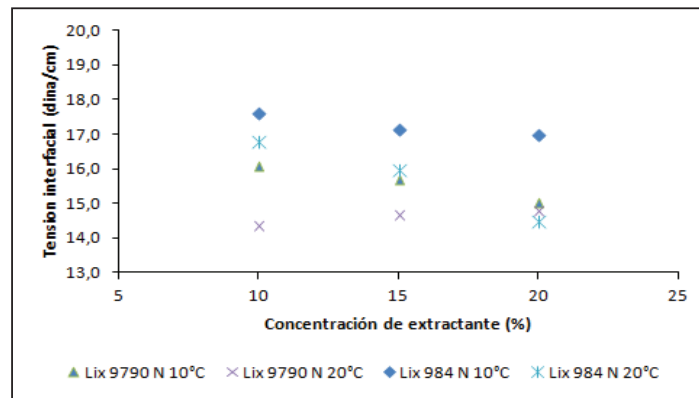


Figura 42: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las mezclas a pH 1,6

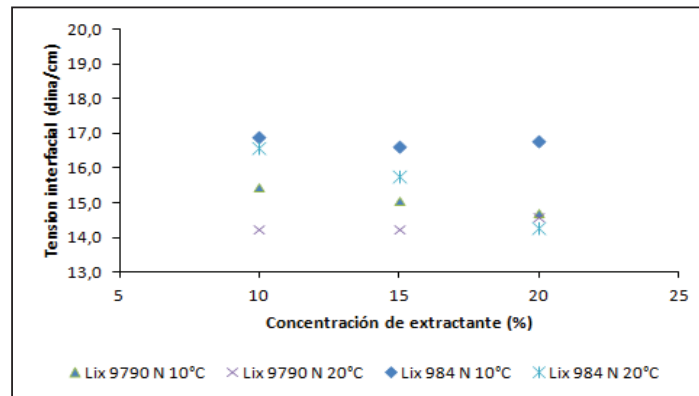


Figura 43: Efecto de la concentración de extractante y temperatura en la tensión interfacial de las mezclas a pH 2,0

Las Figura 42 y Figura 43, muestran la variación de la tensión interfacial al modificar la temperatura y concentración de extractante para las mezclas, ocurre el mismo fenómeno que para las oximas anteriores, el Lix 9790N presenta valores anómalos ya que aumenta la tensión a 10°C y 20°C al cambiar de 10% al 15% de extractante, tal como observa en tabla de los anexos B.1, B.2 y B.3.

Las tensiones más altas en promedio las tienen las cetoximas, seguidas por las mezclas y finalmente las adoximas.

Entre las Figura 38 y Figura 43, se observa que en su mayoría la tensión tiende a disminuir a medida que aumenta la concentración de extractante y la temperatura. Esta situación se debe a que disminuye las fuerzas inter-iónicas entre las gotas de ambas fases, resultados similares se obtienen en trabajos de investigación de sistemas líquidos – líquidos, Lagissety et al.,(1986); Sathyagal et al.,(1996); Kosshy et al.,(1988) (citado por Ruiz et al.,2002).

4.2.4. Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial a 10°C y 20°C

A continuación, se muestra el efecto que tiene la concentración de extractante y el pH 1,6 y pH 2,0 en la tensión interfacial.

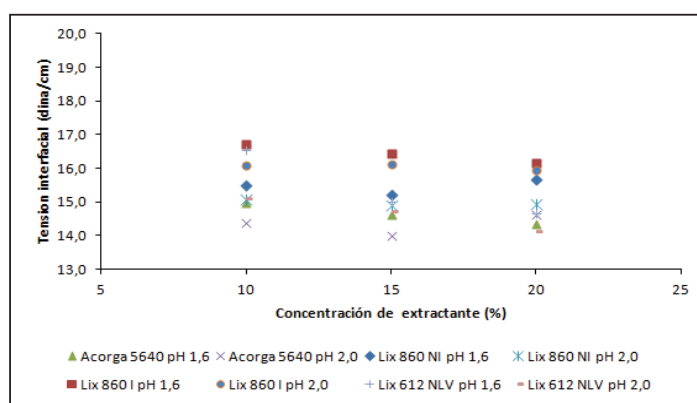


Figura 44: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las aldoximas a 10°C

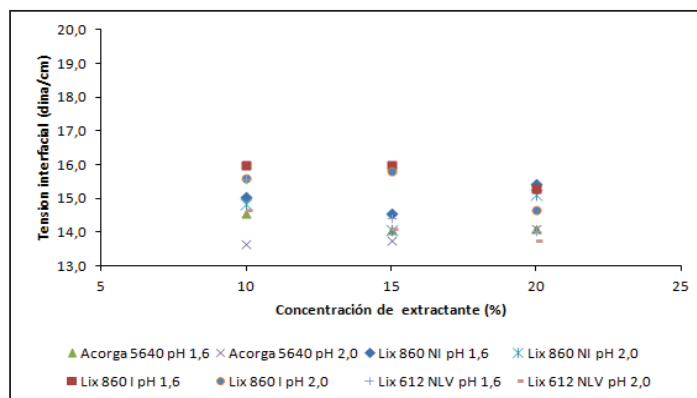


Figura 45: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las aldoximas a 20°C

Las Figura 44 y Figura 45, muestran la variación de la tensión interfacial al modificar la concentración de extractante y pH para las aldoximas, se observa una disminución de la tensión a medida que aumenta la concentración del extractante y el pH, las aldoximas modificadas presentan los niveles más bajos de tensión para ambos pH, como se observa en las tablas de los anexos B.1, B.2 y B.3.

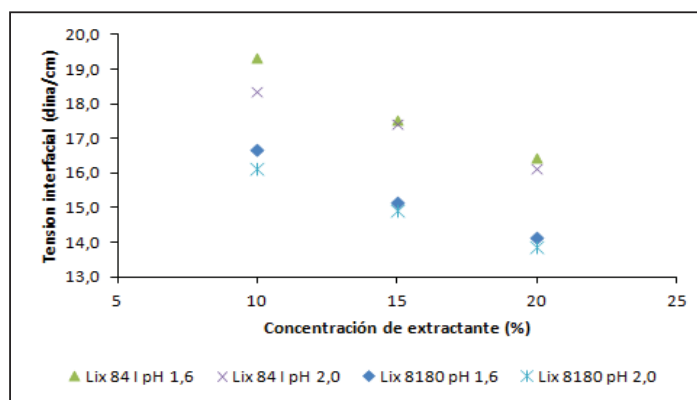


Figura 46: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las cetoxima a 10°C

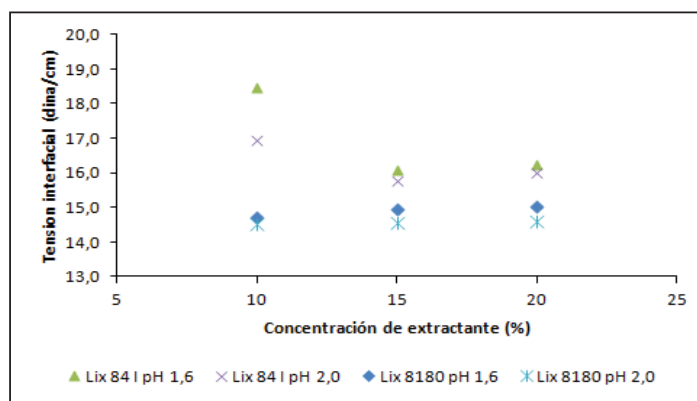


Figura 47: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las cetoximas a 20°C

Las Figura 46 y Figura 47, muestran que a medida que aumenta la concentración del extractante y el pH la tensiones disminuyen en forma lineal a 10°C tanto para pH 1,6 y pH 2,0, no así en a los 20 °C donde tiende a mantener el mismo nivel de tensión, las tablas se muestran en anexos B.1, B.2 y B.3.

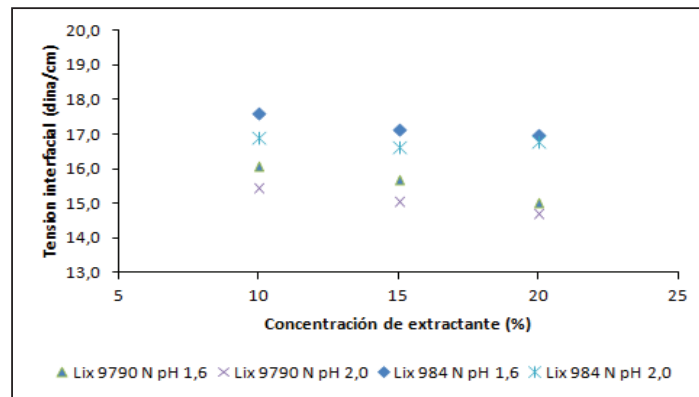


Figura 48: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las mezclas a 10°C

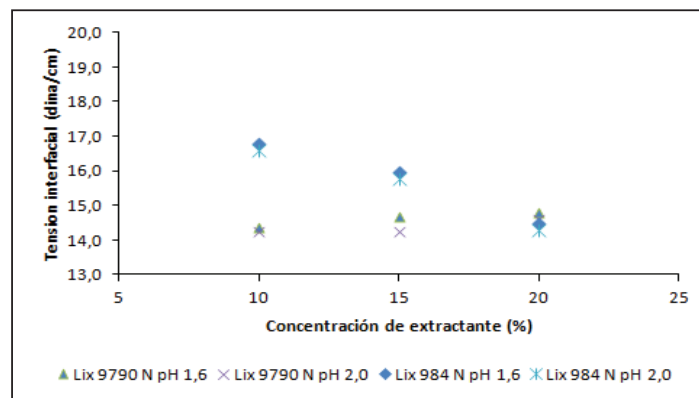


Figura 49: Efecto de la concentración de extractante y pH en la tensión interfacial de las mezclas a 20°C

Las Figura 48 y Figura 49, muestran que a medida que aumenta la concentración del extractante y el pH la tensiones disminuyen en forma lineal a 10°C tanto para pH 1,6 y pH 2,0 para el caso del Lix 984 N, el caso del Lix 9790N no sigue una tendencia clara, la tabla de resultados se observan en los anexos B.1, B.2 y B.3.

Entre las Figura 44 y Figura 49, se observa una tendencia de la tensión interfacial de disminuir a medida que aumenta el pH, tal situación debe a que la en la superficie de las gotas orgánicas los iones negativos de hidróxidos son especial y espontáneamente absorbidos (Marinova et al.,1996).

Las tensiones más altas en promedio las tienen las cetoximas, seguidas por las mezclas y finalmente las adoximas.

4.2.5. Efecto de la temperatura en el tiempo de separación de fase a 500 rpm

En las Figura 50, Figura 51 y Figura 52, se muestran los tiempos de separación de fases de todos los reactivos con una concentración de extractante del 10%, 15% y 20% respectivamente a 500 rpm. (Ver tabla anexo C.1 y C.2).

En los gráficos se aprecia que a medida que aumenta la temperatura disminuye el tiempo de separación de las fases, esta situación se debe a la reducción de la viscosidad de las fases, que hacen que las fuerzas de cohesión entre las moléculas del líquido disminuyan.

Al incrementar la concentración de extractante del 10% al 20%, lo que se está haciendo es aumentar precisamente la variable más importante en el tiempo de separación de las fases, la viscosidad.

Las aldoximas modificadas Acorga 5640 y Lix 612 NLV son los reactivos que tienen el peor desempeño, esta situación se puede deber a su composición química, ya que los modificadores en las oximas generan un aumento en la viscosidad, lo que repercutirá en los tiempos de separación de fases.

Las mezclas Lix 9790N y Lix 984 N, no presentan grandes fluctuaciones en los tiempos, por lo general no superan 2 a 4 segundos de diferencia.

Las cetoximas muestran un comportamiento dispar, mientras el Lix 84 I presenta los tiempos más breves de separación el Lix 8180 se comporta muy similar a las aldoximas modificadas.

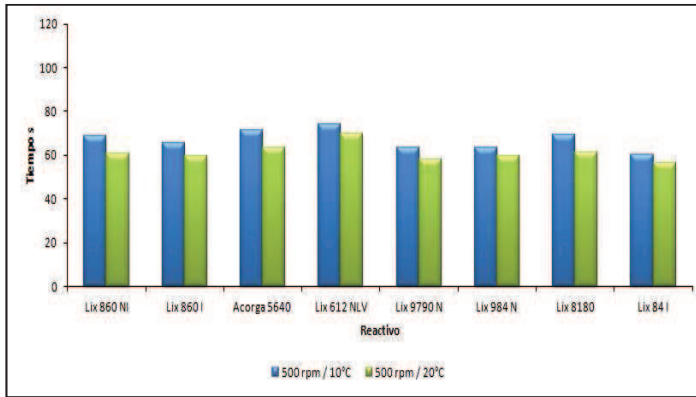


Figura 50: Efecto de la temperatura en el TSF al 10% de extractante a 500 rpm

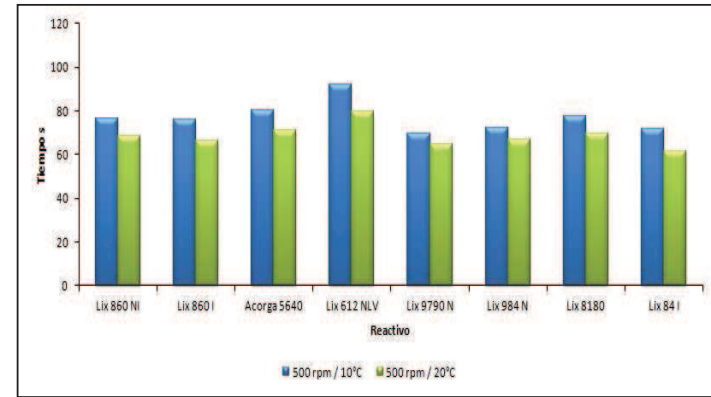


Figura 51: Efecto de la temperatura en el TSF al 15% de extractante a 500 rpm

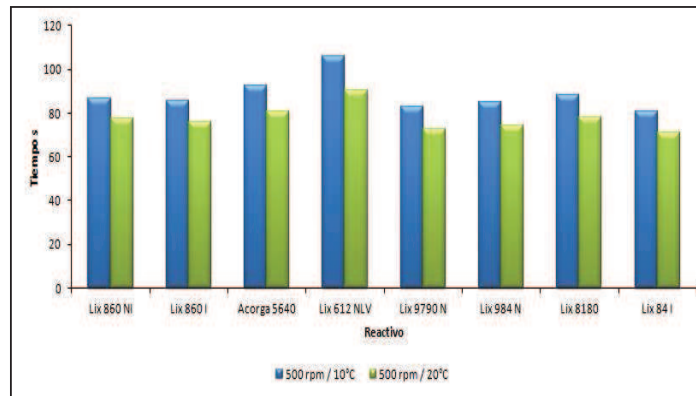


Figura 52: Efecto de la temperatura en el TSF al 20% de extractante a 500 rpm

4.2.6. Efecto de la temperatura en el tiempo de separación de fase a 700 rpm

En las Figura 53, Figura 54 y Figura 55, muestran los tiempos de separación de fases de todos los reactivos con una concentración de extractante del 10%, 15% y 20% respectivamente a 700 rpm. (Ver tabla anexo C.1 y C.2).

Al igual que en el caso donde la agitación es de 500 rpm, a medida que aumenta la temperatura disminuye el tiempo de separación de las fases, esta situación se debe a que existe una disminución en la viscosidad y densidad de las fases, que hacen que las fuerzas de cohesión entre las moléculas del líquido disminuyan.

Sí se compara el efecto que tiene la concentración de extractante en los tiempos de separación de fase, se observa que un aumento de este último genera un aumento en los tiempos, esto se debe a que existe un incremento en la viscosidad y densidad, por lo que el desplazamiento de las moléculas es más lento en el proceso de separación de las fases.

En general, tanto a 500 rpm y 700 rpm, al aumentar la temperatura existe el mismo comportamiento de los reactivos.

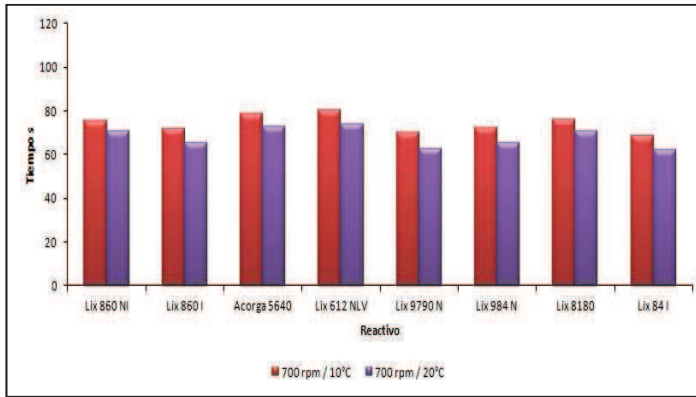


Figura 53: Efecto de la temperatura en el TSF al 10% de extractante a 700 rpm

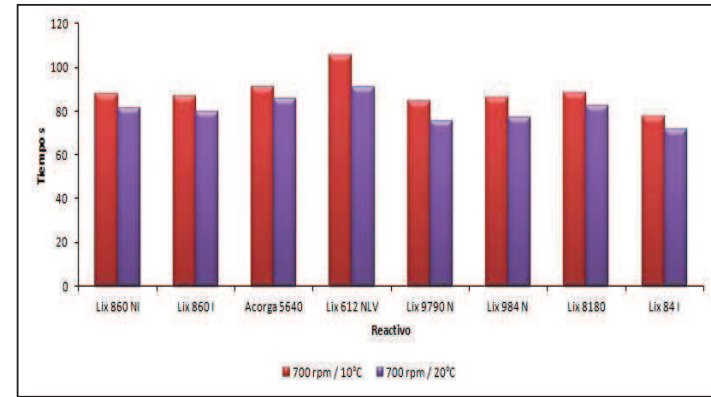


Figura 54: Efecto de la temperatura en el TSF al 15% de extractante a 700 rpm

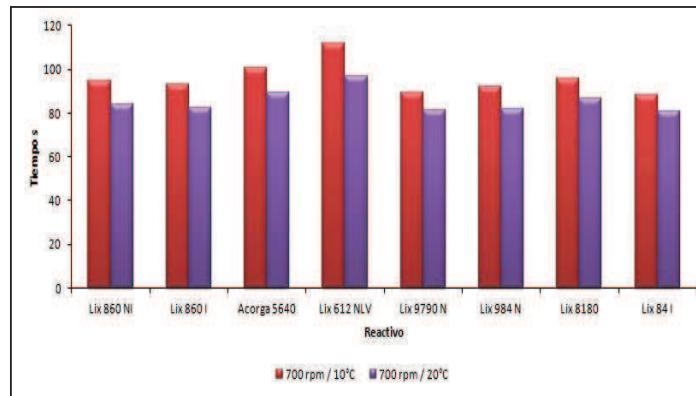


Figura 55: Efecto de la temperatura en el TSF al 20% de extractante a 700 rpm

4.2.7. Efecto de la agitación en el tiempo de separación de fase a 10°C

En las Figura 56, Figura 57 y Figura 58, se muestran los tiempos de separación de fases de todos los reactivos con una concentración de extractante del 10%, 15% y 20% respectivamente a 10°C. (Ver tabla anexo C.1 y C.2).

En los gráficos se aprecia que a medida que aumenta la agitación los tiempos de separación de fase tienden a incrementarse, esto se debe a que al aumentar la agitación se generan gotas cada vez más pequeñas, las cuales deben unirse a otras para que por diferencia de densidades puedan moverse hacia la fase correspondiente, tal como sostiene Semiat et al.(1995) y Ruiz et al (2002) que al aumentar la velocidad del agitador existe una disminución en la coalescencia de las gotas por ende los tiempos de separación de fase aumentan.

Las aldoximas modificadas Acorga 5640 y Lix 612 NLV son los reactivos que tienen el peor desempeño. Al tener más viscosidad se favorece la creación de micro-gotas en el mezclado afectando el tiempo de separación de fases (Denkov et al.,2007).

Las mezclas Lix 9790N y Lix 984 N, no presentan grandes fluctuaciones en los tiempos, por lo general no superan 2 a 4 segundos de diferencia.

Las cetoximas muestran un comportamiento dispar, mientras el Lix 84 I presenta los tiempos más breves de separación el Lix 8180 se comporta similar a las aldoximas modificadas.

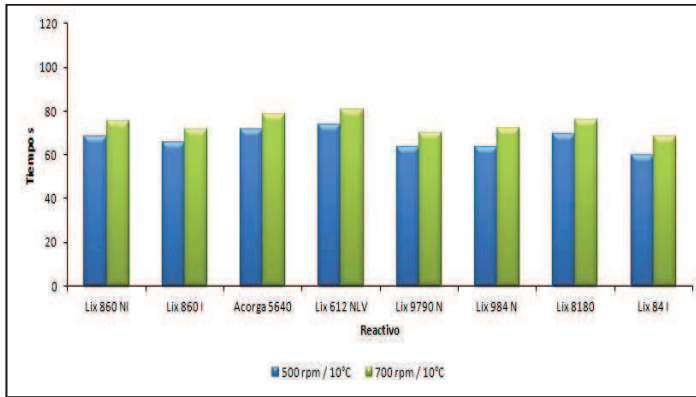


Figura 56: Efecto de la agitación en el TSF al 10% de extractante a 10°C

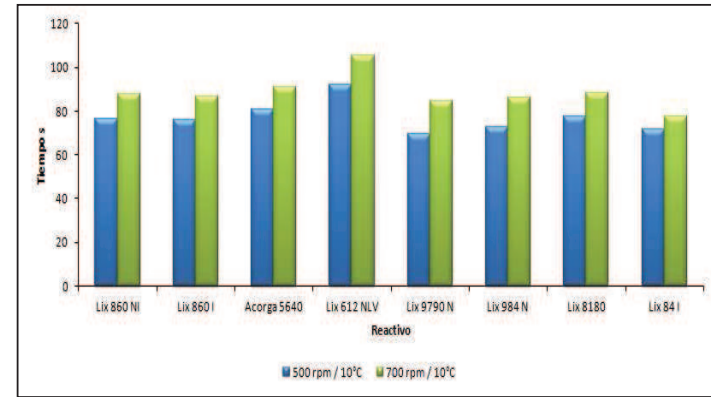


Figura 57: Efecto de la agitación en el TSF al 15% de extractante a 10°C

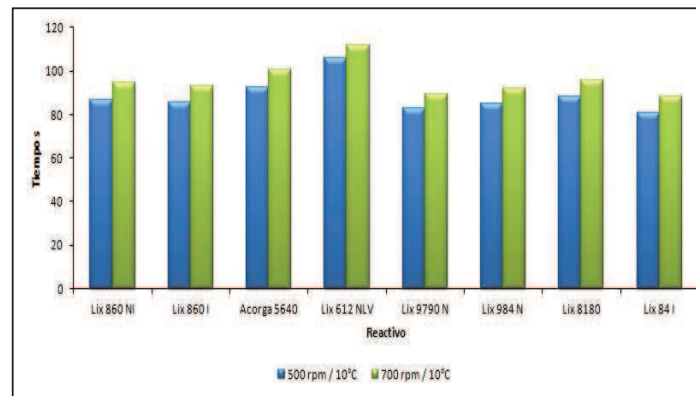


Figura 58: Efecto de la agitación en el TSF al 20% de extractante a 10°C

4.2.8. Efecto de la agitación en el tiempo de separación de fase a 20°C

En las Figura 59, Figura 60 y Figura 61, se muestran los tiempos de separación de fases de todos los reactivos con una concentración de extractante del 10%, 15% y 20% respectivamente a 20°C. (Ver tabla anexo C.1 y C.2).

Al igual que en el caso donde la temperatura es de 10°C, a medida que aumenta la agitación, se incrementa el tiempo de separación de fases. Los tiempos de separación son menores que a 10°C pero siguen la misma tendencia.

Ocurre el mismo fenómeno también al aumentar la concentración de extractante del 10% al 20%, es decir, se aumenta la viscosidad lo que desencadena un aumento en los tiempos.

El anexo E.1 muestra los tiempos medios de separación de fase a distintas concentraciones de extractante, temperatura y agitación.

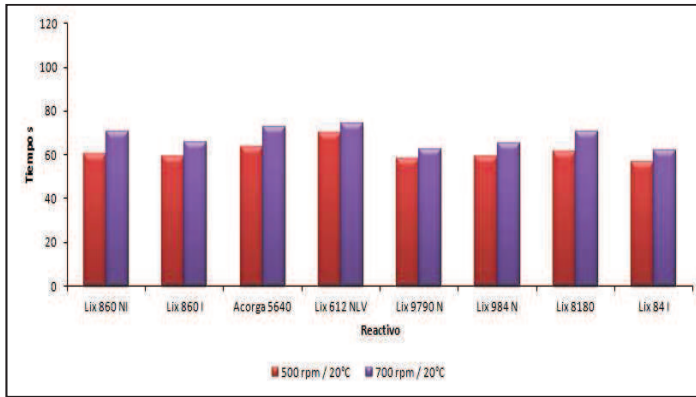


Figura 59: Efecto de la agitación en el TSF al 10% de extractante a 20°C

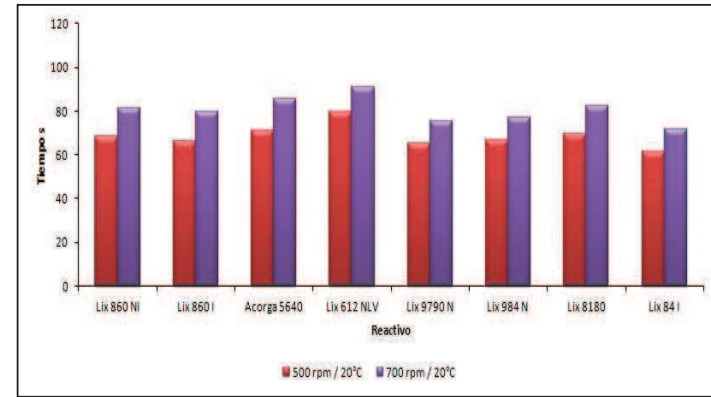


Figura 60: Efecto de la agitación en el TSF al 15% de extractante a 20°C

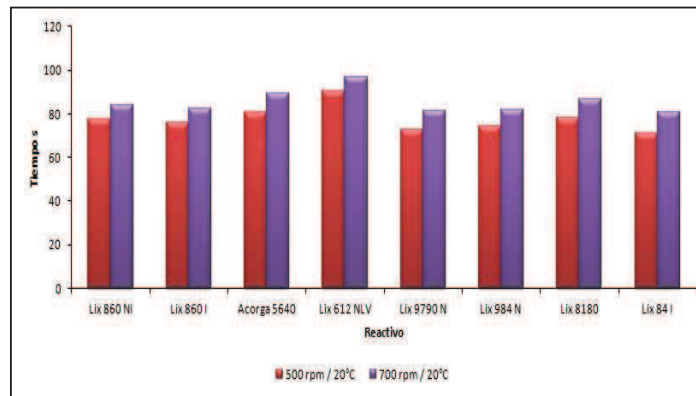


Figura 61: Efecto de la agitación en el TSF al 20% de extractante a 20°C

4.2. Resultados de arrastres O/A

4.2.1. Efecto de la temperatura en los arrastres O/A

Entre las Figura 62 y Figura 67, se muestra el efecto de la temperatura en el arrastre O/A a 500 rpm y 700 rpm, a distintas concentraciones de extractante. (Ver tabla anexo D.2).

En los gráficos se aprecia que a medida que aumenta la temperatura, se incrementan los arrastres O/A, a cualquier concentración de extractante, esta situación se debe a que al aumentar la temperatura disminuye la coalescencia entre las gotas. Ruiz et al.,(2002) sostiene que al medir la distribución de tamaño de las gotas, estas tienden a ser más pequeñas al incrementar la temperatura . Pugh et al., (2011), establecieron que la coalescencia de las gotas en un sistema liquido – liquido se ve disminuido cuando es expuesto a largos periodos de tiempos a elevadas temperaturas.

La disminución en la coalescencia de las gotas produce que gotas pequeñas queden atrapadas en la fase dispersa y/o dispersante, favoreciendo los arrastres O/A.

Al aumentar la concentración de extractante, se incrementan los arrastres, esto se debe a que existe un aumento en la viscosidad de la fase dispersa, tal como sostiene Denkov et al., (2007), al aumentar la viscosidad existe una mayor probabilidad de formar micro-gotas, que no coleasen entre sí, lo que genera una distribución de gotas finas en el sistema, y que quedaran atrapadas en la fase dispersante.

Las aldoximas modificadas Acorga 5640 y Lix 612 NLV son los reactivos que tienen el nivel de arrastre O/A más alto a las distintas temperaturas, alcanzando los 123 y 125 ppm al 20% de extractante respectivamente.

Las aldoximas puras presentan un nivel de arrastre O/A menor que las modificadas, sin embargo, son mayores que las mezclas y que la cetoxima Lix 84 I.

Las mezclas Lix 9790N y Lix 984 N, por lo general mantienen los niveles de arrastre O/A similares, no existe una variación significativa de un reactivo al otro, ambos incrementan los arrastres al modificar la concentración de extractante de 10% a 15% y 20%. Los resultados de arrastre del Lix 984N al 15% de extractante presenta una anomalía, ya que resulta menor que al 10%, esta situación solo se dio en este reactivo y en esta condición.

Las cetoximas muestran un comportamiento dispar, mientras el Lix 84 I presenta los niveles de arrastre O/A más bajos de todos los reactivos, el Lix 8180 se comporta como una aldoxima modificada.

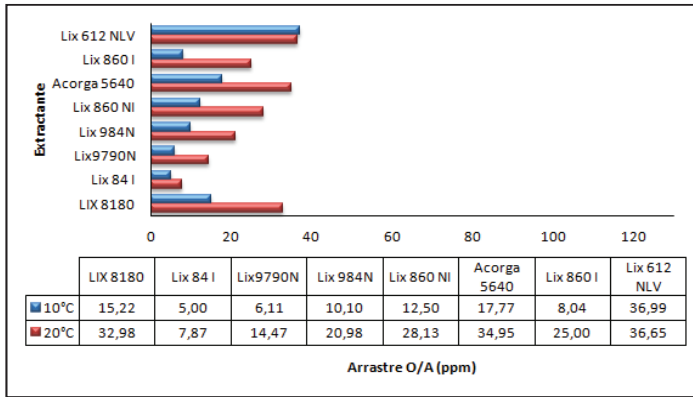


Figura 62: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 500 rpm y al 10% de extractante

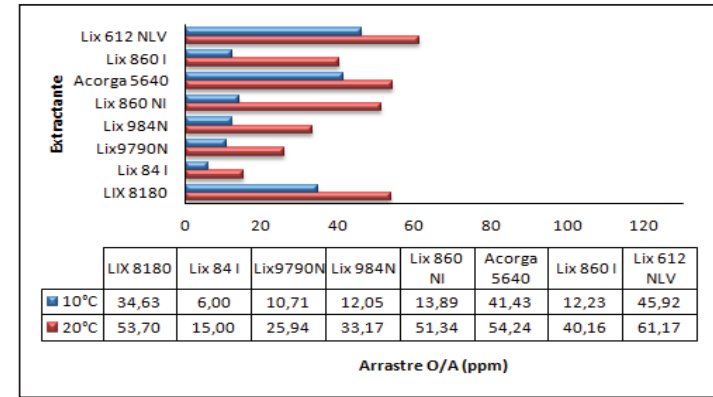


Figura 63: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 700 rpm y al 10% de extractante

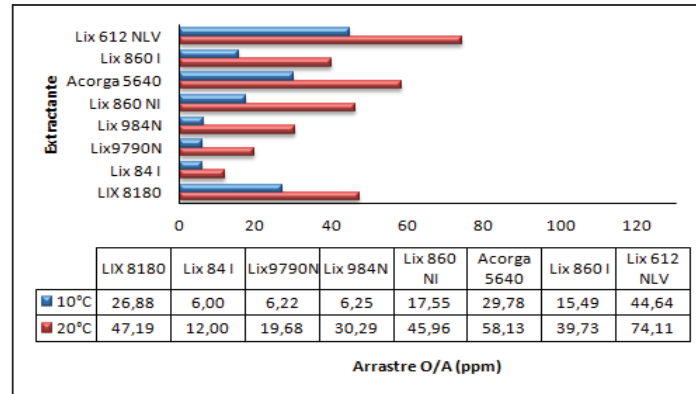


Figura 64: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 500 rpm y al 15% de extractante

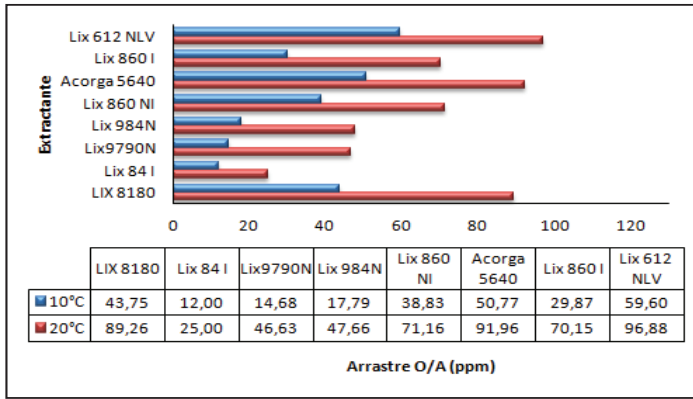


Figura 65: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 700 rpm y al 15% de extractante

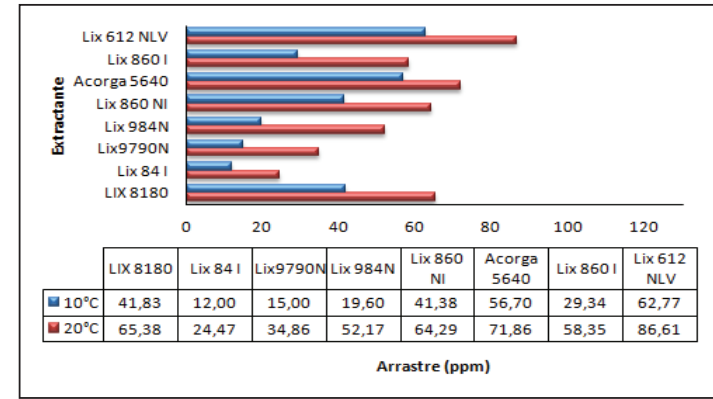


Figura 66: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 500 rpm y al 20% de extractante

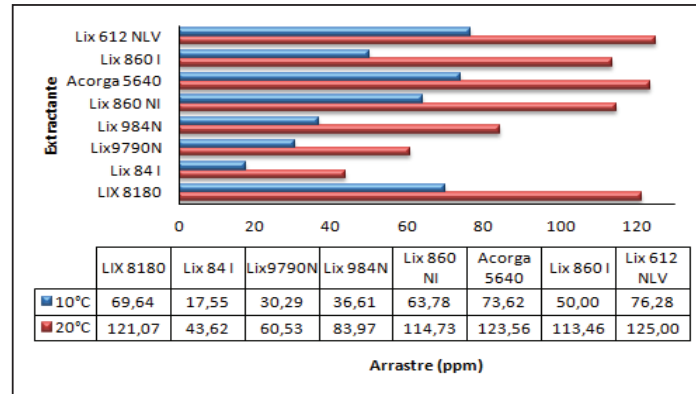


Figura 67: Efecto de la temperatura en los arrastres O/A a 700 rpm y al 20% de extractante

4.2.2. Efecto de la agitación en los arrastres O/A

Entre las Figura 68 y Figura 73, se muestra el efecto de la agitación en el arrastre O/A a 10°C y 20°C, con distintas concentraciones de extractante. (Ver tabla anexo D.2).

En los gráficos se aprecia que a medida que aumenta la agitación, se incrementan los arrastres O/A, a cualquier concentración de extractante, esta situación se debe a que al aumentar la agitación de 500 rpm a 700 rpm se favorece la generación de micro-gotas que no logran coalescer, por ende quedan atrapadas en una fase distinta, esta hipótesis es compartida con diferentes trabajos de investigación tales como Ruiz (Ruiz et al., 2002), Semiat (Semiat et al., 1995), entre otros.

Las aldoximas modificadas Acorga 5640 y Lix 612 NLV son los reactivos que tienen el nivel de arrastre O/A más alto a las distintas velocidades de agitación, alcanzando los 125 y 123 ppm al 20% de extractante respectivamente.

Las aldoximas puras presentan niveles de arrastre menores que las modificadas pero mayores que las mezclas y la cetoxima Lix 84 I.

Las mezclas Lix 9790N y Lix 984 N, por lo general mantienen los niveles de arrastre O/A similares, no existe una variación significativa de un reactivo al otro, ambos incrementan los arrastres al modificar la concentración de extractante de 10% a 15% y 20%, y la agitación.

Las cetoximas muestran un comportamiento dispar, mientras el Lix 84 I presenta los niveles de arrastre O/A más bajos de todos los reactivos, el Lix 8180 se comporta como una aldoxima modificada.

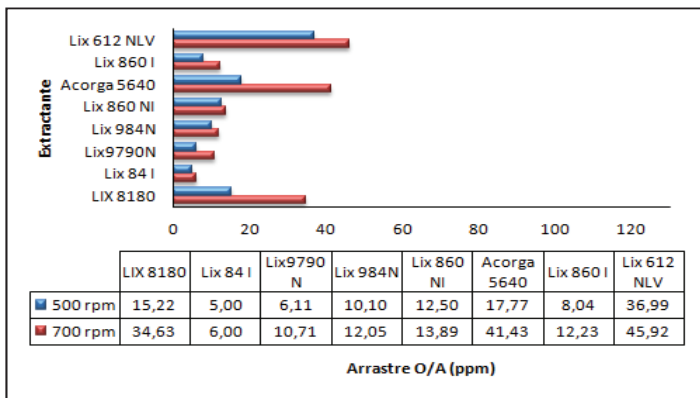


Figura 68: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 10°C y 10% extractante

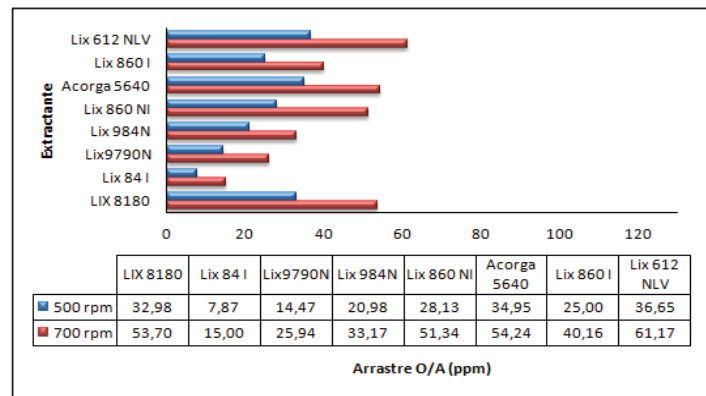


Figura 69: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 20°C y 10% de extractante

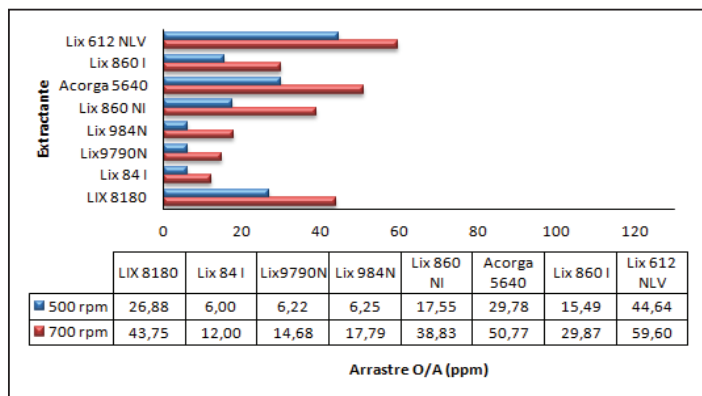


Figura 70: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 10°C y 15% extractante

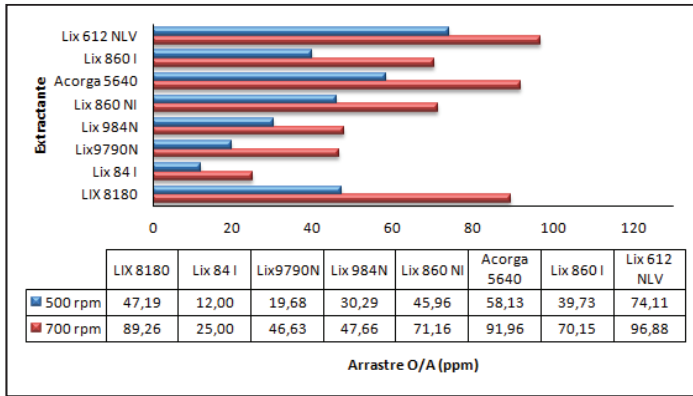


Figura 71: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 20°C y 15% de extractante

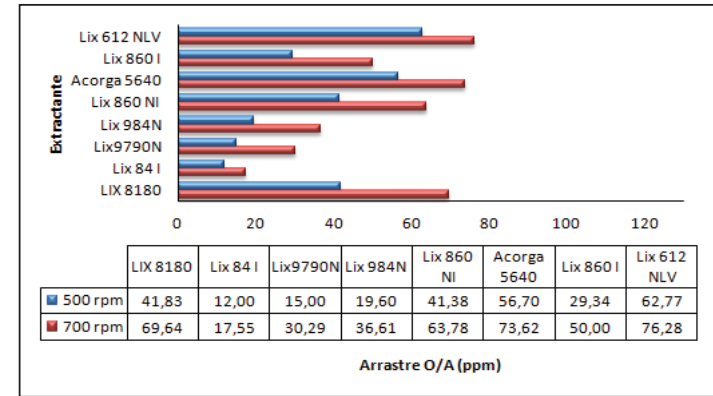


Figura 72: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 10°C y 20% de extractante

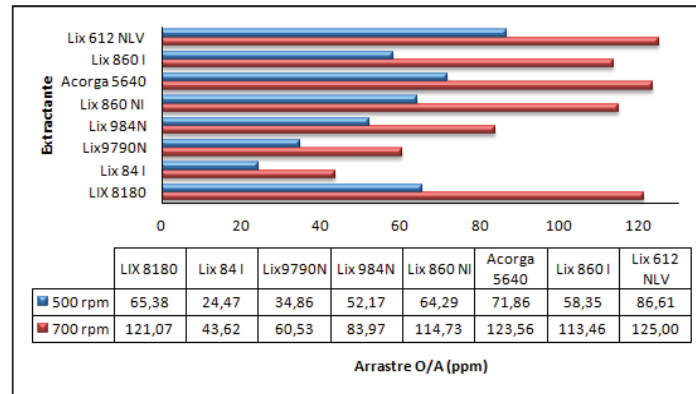


Figura 73: Efecto de la agitación en los arrastres O/A a 20°C y 20% de extractante

4.2.3. Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente

Entre las Figura 74 y Figura 76, se muestra el efecto que tiene el pH en los arrastres O/A con una concentración de extractante del 10%, 15% y 20% a temperatura ambiente. (Ver tabla anexo D.1).

En los gráficos se aprecia que a medida que aumenta el pH, se incrementan los arrastres O/A, esta situación se asocia a la disminución de la tensión interfacial. El aumento de arrastre O/A por efecto del pH se contrapone a los resultados obtenidos por Ruiz et al.(2002), ya que se en esa investigación se encuentra que a medida que el pH aumenta, se incrementa el tamaño de las gotas, por ende no debería existir un aumento en el arrastre O/A. Sin embargo, otros autores como Tobin y Ramkrishma.(1992) estudiando el efecto del pH en la coalescencia de las gotas en fase acuosa usando benceno y tetra cloruro de carbono encontraron que el pH inhibe la coalescencia.(citado por Ruiz et al.,2002).

Las aldoximas modificadas Acorga 5640 y Lix 612 NLV son los reactivos que tienen el nivel de arrastre O/A más alto a los distintos pH, alcanzando los 161 y 181 ppm a un pH 2,0 y 20% de extractante respectivamente.

Las mezclas no presentan grandes variaciones al usar uno u otro reactivo.

Las cetoximas muestran un comportamiento dispar, mientras el Lix 84 I presenta los tiempos más breves de separación el Lix 8180 se comporta muy similar a las aldoximas modificadas.

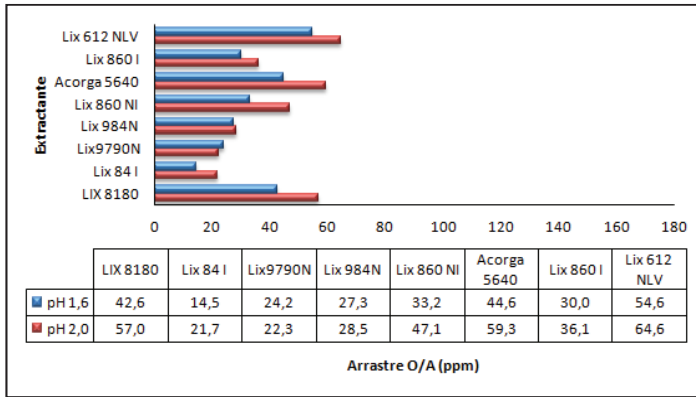


Figura 74: Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente y 10% de extractante

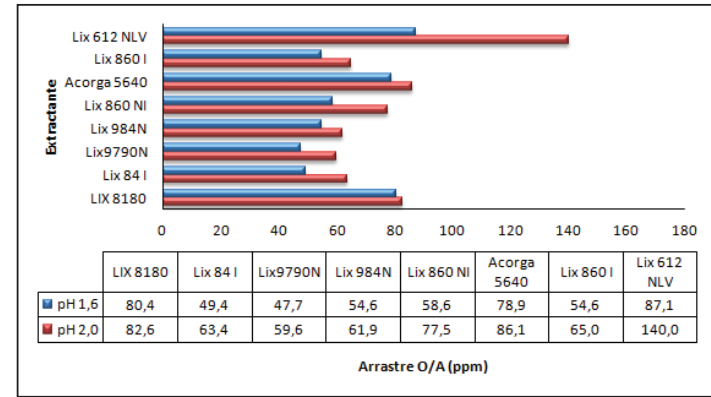


Figura 75: Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente y 15% de extractante

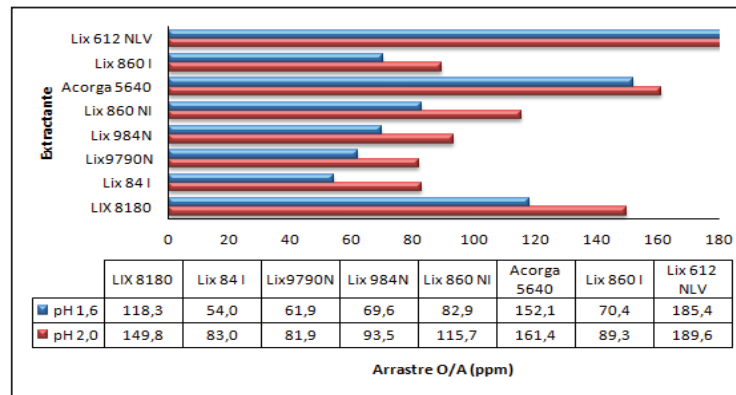


Figura 76: Efecto del pH en los arrastres O/A a temperatura ambiente y 20% de extractante

4.2.4. Efecto del sistema de muestreo en el nivel de arrastre O/A

La Figura 77, Figura 78, Figura 79, Figura 80, Figura 81 y Figura 82 muestran los resultados de nivel de arrastre O/A que se obtuvieron con distintos mecanismos de muestreos, estos son: por la zona superior, zona inferior y celda de extracción, todas metodologías explicadas en el desarrollo experimental.

Las pruebas se realizan con un PLS de pH 1,6, y 2,0; agitación de 700 rpm y temperatura ambiente, ya que no es posible controlar esta variable en la celda de extracción.

Como se observa en las Figura 77, Figura 78, Figura 79, Figura 80, Figura 81 y Figura 82, el muestreo desde la celda de extracción es el que presenta niveles más altos de arrastres O/A, esta situación se debe a que la emulsión en las pruebas en la celda no tienen el mismo tiempo que en el reactor para la separación de las fases, esto ya que el tiempo en que pasa la solución desde el mezclador y decantador al vertedero es menor.

El sistema de muestreo por la zona inferior se aplica al reactor, la zona inferior se refiere a la llave de paso que presenta el reactor, de los resultados se observa que el nivel de arrastre es menor que el de la celda de extracción, sin embargo es mayor que al tomar la muestra por la zona superior, esta última situación se debe a que por lo general las gotas de orgánico se pegan al vidrio cuando existe una diferencia de temperatura entre el exterior e interior del reactor, por lo que al abrir la llave de paso del reactor el orgánico adherido a las paredes del reactor escurrirá hacia la salida del refino aumentando el nivel real de arrastre O/A. El sistema de muestreo por la zona superior tiene mayor representatividad ya que la muestra se obtiene del seno del fluido.

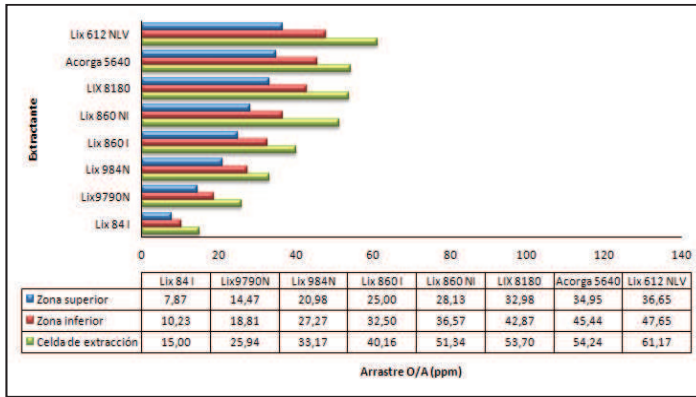


Figura 77: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 1,6 y 10% de extractante

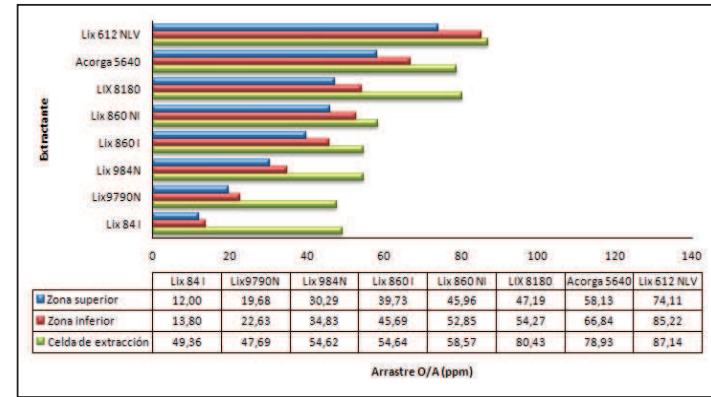


Figura 78: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 1,6 y 15% de extractante

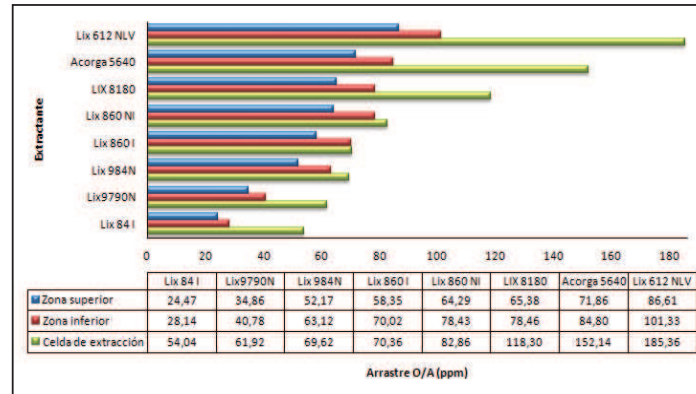


Figura 79: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 1,6 y 20% de extractante

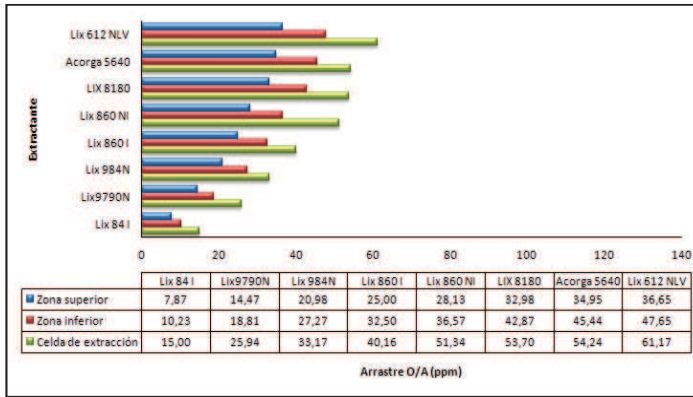


Figura 80: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 2,0 y 10% de extractante

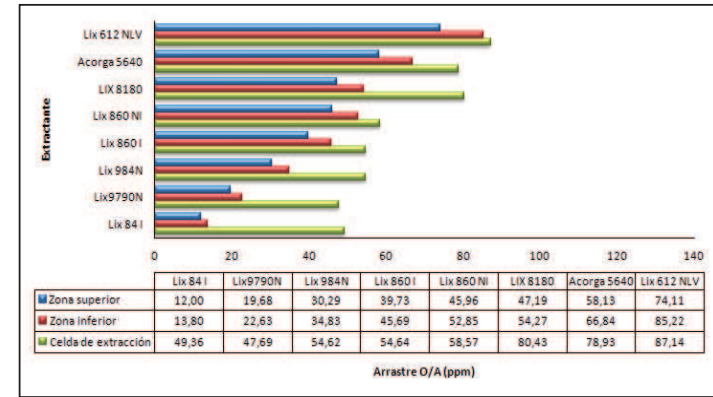


Figura 81: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 2,0 y 15% de extractante

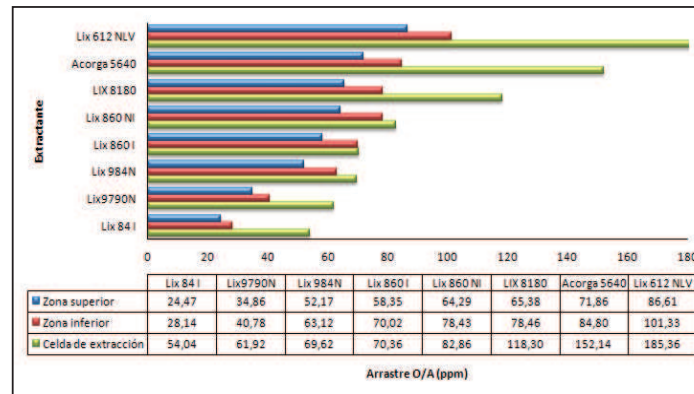


Figura 82: Efecto del tipo de muestreo en el nivel de arrastre O/A a pH 2,0 y 20% de extractante

4.3. Resultados de ANOVA

4.3.1. Efecto de la concentración de extractante en el arrastre O/A.

Los criterios de rechazo de la hipótesis nula H_0 son:

Se rechaza H_0 si $p\text{-valor} \leq \alpha$

$\alpha=0,05$

No se rechaza H_1 si $p\text{-valor} > \alpha$

Donde:

H_0 : El arrastre O/A no depende del aumento en la concentración de extractante

H_1 : El arrastre O/A sí depende del aumento en la concentración de extractante

Fuente	GL	SC	CM	F	P
%Extractante	2	7244	3622	18,03	0,021
Error	3	603	201		
Total	5	7847			

S = 14,17 R-cuad. = 92,32% R-cuad. (ajustado) = 87,20%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.
10,00%	2	49,79	10,23
15,00%	2	81,49	1,50
20,00%	2	134,04	22,27

Figura 83: Análisis ANOVA del reactivo Lix 8180

Se observa en la Figura 83 que se rechaza la hipótesis nula, ya que el p -valor es menor a α y se le da crédito a la hipótesis alternativa, es decir, para el caso del Lix 8180 es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A, principalmente al aumentar de 15% al 20%.

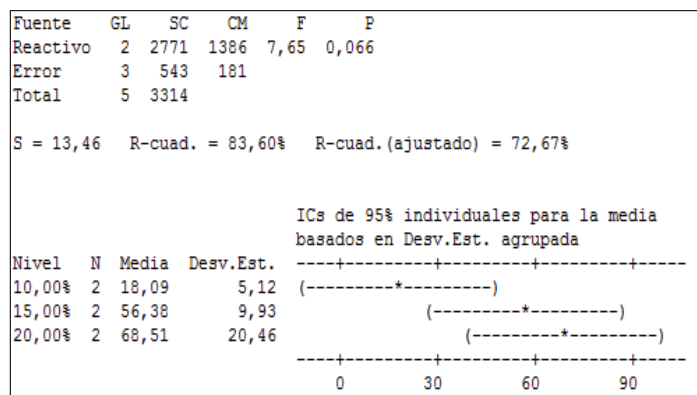


Figura 84: Análisis ANOVA del reactivo Lix 84 I

Se observa en la Figura 84 que no se rechaza la hipótesis nula, ya que el p-valor es mayor a α , es decir, para el caso del Lix 84 I no es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A, principalmente al aumentar del 15% al 20%.

Los reactivos pertenecientes a las cetoximas tales como el Lix 8180 y Lix 84 I no presentan la misma respuesta, en el primer caso el aumento de concentración de extractante sí influye en el nivel de arrastre O/A, en cambio en el caso de Lix 84 I no es estadísticamente significativo el efecto.

Al comparar el estadístico $R^2_{(ajustado)}$ de ambos reactivos, se obtiene que para el caso del Lix 8180 presenta un 87% en cambio el Lix 84 I un 72%, esta variación se puede deber a que durante las pruebas existieron variables que no pudieron ser controladas.

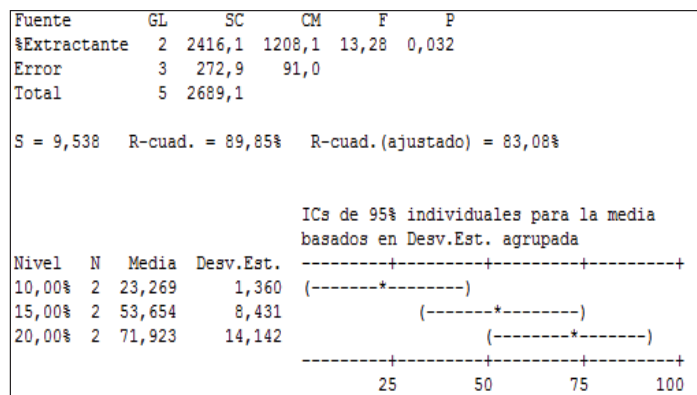


Figura 85: Análisis ANOVA del reactivo Lix 9790 N

Se observa en la Figura 85 que se rechaza la hipótesis nula, ya que el p-valor es menor a α y se le da crédito a la hipótesis alternativa, es decir, para el caso del Lix 9790 N es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A, principalmente al aumentar de 10% al 15%.

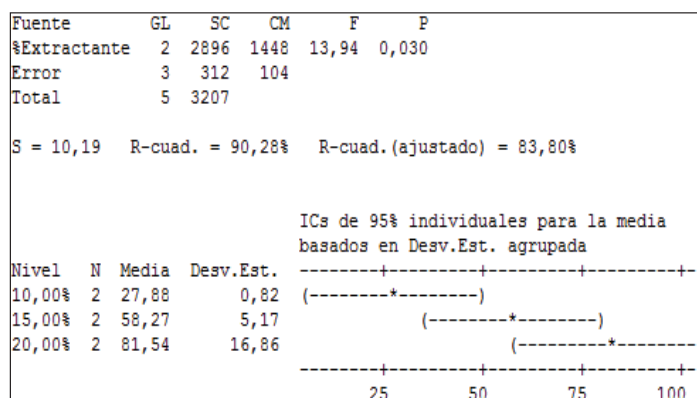


Figura 86: Análisis ANOVA del reactivo Lix 984 N

Se observa en la Figura 86 que se rechaza la hipótesis nula, ya que el p-valor es menor a α y se le da crédito a la hipótesis alternativa, es decir, para el

caso del Lix 984 N es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A.

Los reactivos pertenecientes a las mezclas tales como el Lix 984N y Lix 9790N presentan la misma respuesta, en ambos casos, es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el arrastre O/A.

Al comparar el estadístico $R^2_{(ajustado)}$ de las mezclas, se obtiene que para ambos casos se obtuvo un porcentaje similar del 83%.

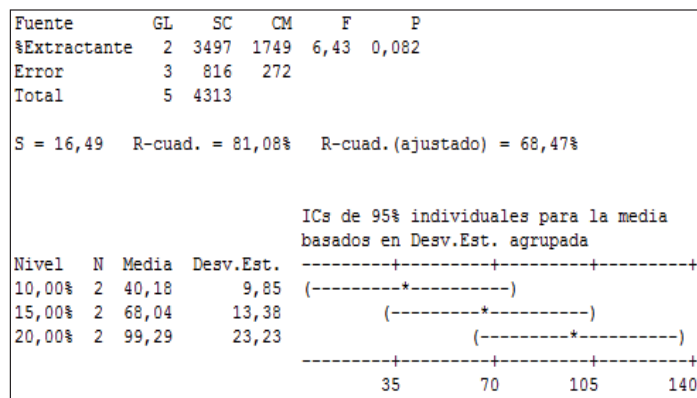


Figura 87: Análisis ANOVA del reactivo Lix 860 NI

Se observa en la Figura 87 que no se rechaza la hipótesis nula, ya que el p-valor es mayor a α , es decir, para el caso del Lix 860 NI no es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
%Extractante	2	11625,6	5812,8	99,18	0,002
Error	3	175,8	58,6		
Total	5	11801,4			

S = 7,656 R-cuad. = 98,51% R-cuad. (ajustado) = 97,52%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	-----+-----+-----+-----
10,00%	2	51,96	10,35	(-----*-----)
15,00%	2	82,50	5,05	(-----*-----)
20,00%	2	156,79	6,57	(-----*-----)

+-----+-----+-----+-----
35 70 105 140

Figura 88: Análisis ANOVA del reactivo Acorga 5640

Se observa en la Figura 88 que se rechaza la hipótesis nula, ya que el p-valor es menor a α y se le da crédito a la hipótesis alternativa, es decir, para el caso del Acorga 5640 es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A, principalmente al aumentar del 15% al 20%.

Fuente	GL	SC	CM	F	P
%Extractante	2	2204,3	1102,1	13,16	0,033
Error	3	251,2	83,7		
Total	5	2455,5			

S = 9,151 R-cuad. = 89,77% R-cuad. (ajustado) = 82,95%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	-----+-----+-----+-----
10,00%	2	33,04	4,29	(-----*-----)
15,00%	2	59,82	7,32	(-----*-----)
20,00%	2	79,82	13,38	(-----*-----)

+-----+-----+-----+-----
25 50 75 100

Figura 89: Análisis ANOVA del reactivo Lix 860 I

Se observa en la Figura 89 que se rechaza la hipótesis nula, ya que el p-valor es menor a α y se le da crédito a la hipótesis alternativa, es decir, para el

caso del Lix 860 I es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A.

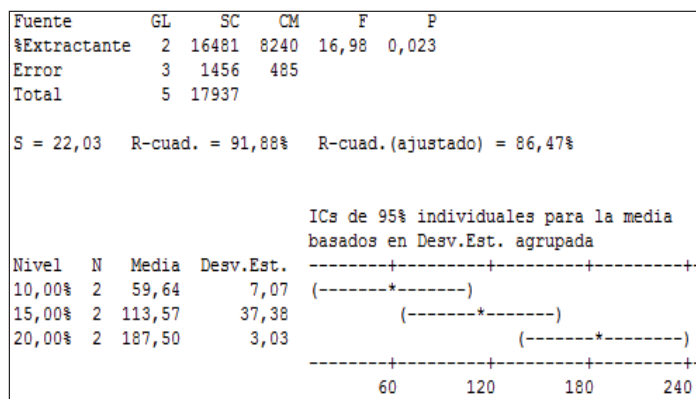


Figura 90: Análisis ANOVA del reactivo Lix 612 NLV

Se observa en la Figura 90 que se rechaza la hipótesis nula, ya que el p-valor es menor a α y se le da crédito a la hipótesis alternativa, es decir, para el caso del Lix 612 NLV es estadísticamente significativo el efecto de la concentración de extractante en el nivel de arrastre O/A, principalmente al aumentar del 15% al 20%.

El caso de las aldoximas es relativamente similar, si bien el Lix 860 NI no presenta un aumento estadísticamente significativo del arrastre O/A producto del incremento de la concentración de extractante, tal situación es puntual ya que los otros tres reactivo pertenecientes a la familia de las aldoximas, si se ven afectados por este factor. Al comparar el estadístico $R^2_{(ajustado)}$ en las aldoximas, se tiene que existe una alta diferencia entre el Lix 860 NI y Acorga 5640 con 68,4% y 97,6% respectivamente, esta situación se puede deber a que durante las pruebas existieron variables que no pudieron ser controladas.

4.3.2. Efecto del tipo de oxima en el arrastre O/A.

Los criterios de rechazo de la hipótesis nula H_0 son:

Se rechaza H_0 si $p\text{-valor} \leq \alpha$

$\alpha=0,05$

No se rechaza H_1 si $p\text{-valor} > \alpha$

Donde:

H_0 : El arrastre O/A no depende de la oxima del extractante

H_1 : El arrastre O/A sí depende de la oxima del extractante

Se define como; nivel 1 a la cetoxima, nivel 2 a la mezcla y nivel 3 a la aldoxima.

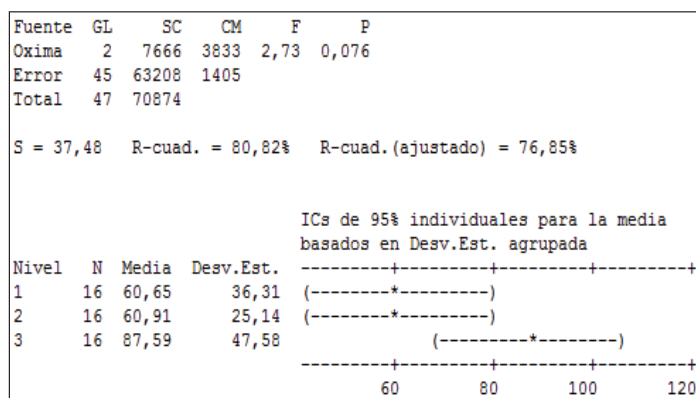


Figura 91: Análisis ANOVA de la oxima del orgánico

Se observa en la Figura 91 que se rechaza la hipótesis nula, ya que el p -valor es menor a α y se le da crédito a la hipótesis alternativa, es decir, el efecto de la oxima en el nivel de arrastre es estadísticamente significativo.

4.4. Análisis factorial

Se aplica el análisis factorial, para determinar si el efecto de la agitación, pH y temperatura es significativo en la generación de arrastres O/A, utilizando los diagramas de pareto.

4.4.1. Efecto de la agitación, pH y temperatura en la cetoxima.

El criterio para determinar si alguna de los parámetros estudiados tiene un efecto significativo en los arrastres O/A es cuando los valores se extienden más allá de la línea de referencia (roja).

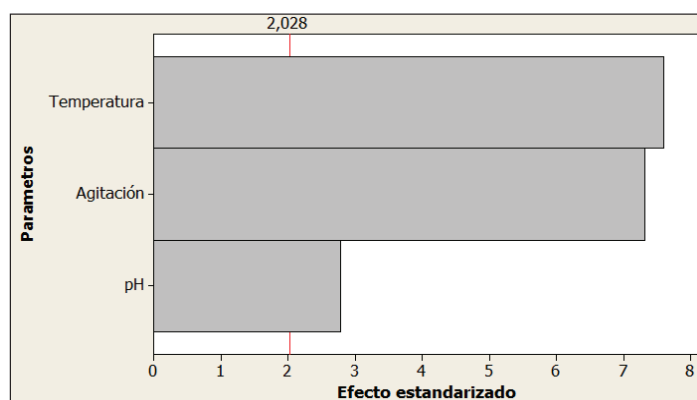


Figura 92: Diagrama de pareto del reactivo Lix 8180

Se observa en la Figura 92 que tanto la temperatura, agitación y pH sobrepasan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí tienen un efecto importante sobre los arrastres O/A.

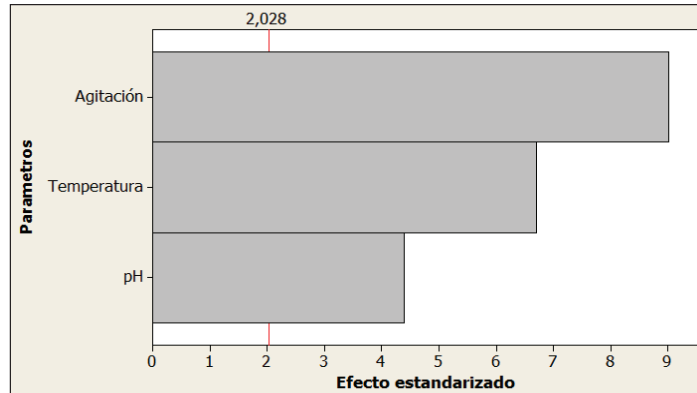


Figura 93: Diagrama de Pareto del reactivo Lix 84 I

Se observa en la Figura 93 que tanto la temperatura, agitación y pH sobrepasan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí tienen un efecto importante sobre los arrastres O/A.

En el caso de las cetoximas tanto el Lix 8180 como el Lix 84 I, la agitación y temperatura tienen mayor influencia en los resultados, en desmedro del pH, sin embargo, para el caso del Lix 8180 es más relevante la temperatura y en el caso del Lix 84 I es la agitación.

4.4.2. Efecto de la agitación, pH y temperatura en la mezcla.

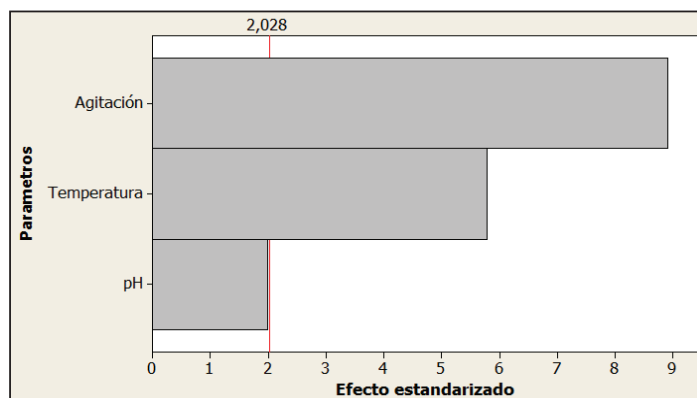


Figura 94: Diagrama de pareto del reactivo Lix 9790 N

Se observa en la Figura 94 que la temperatura y agitación sobrepasan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí tienen un efecto importante sobre los arrastres O/A, no así el pH.

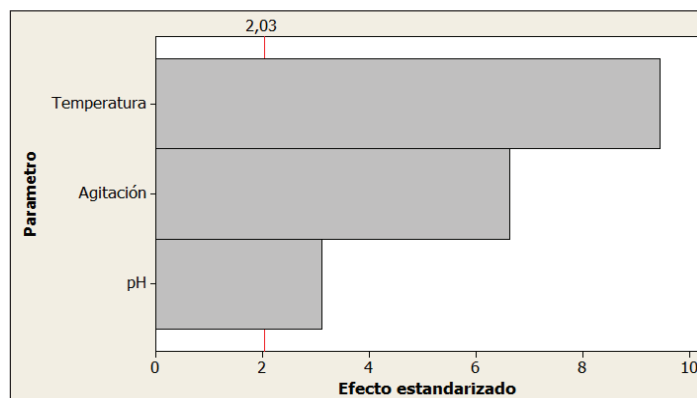


Figura 95: Diagrama de pareto del reactivo Lix 984 N

Se observa en la Figura 95 que tanto la temperatura, agitación y pH sobrepasan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí tienen un efecto importante sobre los arrastres O/A.

En el caso de las mezclas tanto el Lix 9790 N como el Lix 984 N, la agitación y temperatura tienen mayor influencia en los resultados, en desmedro del pH, sin embargo, para el caso del Lix 9790 N es más relevante la agitación y en el caso del Lix 984 N es la temperatura.

4.4.3. Efecto de la agitación, pH y temperatura en la aldoxima.

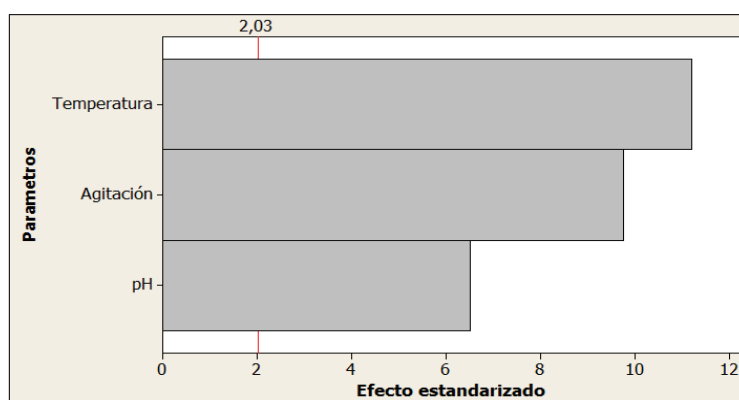


Figura 96: Diagrama de Pareto del reactivo Lix 860 NI

Se observa en la Figura 96 que tanto la temperatura, agitación y pH sobrepasan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí son estadísticamente significativos en los arrastres O/A.

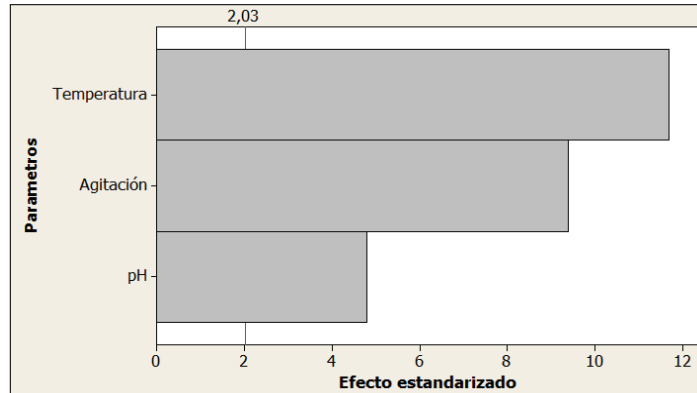


Figura 97: Diagrama de Pareto del reactivo Lix 860 I

Se observa en la Figura 97 que tanto la temperatura, agitación y pH superan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí son estadísticamente significativos en los arrastres O/A.

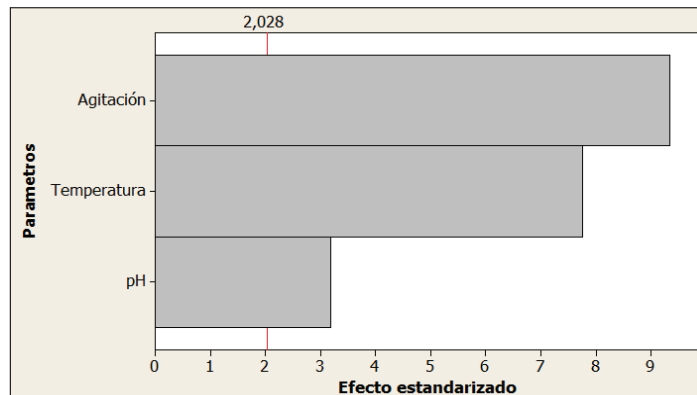


Figura 98: Diagrama de Pareto del reactivo Acorga 5640

Se observa en la Figura 98 que tanto la temperatura, agitación y pH superan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí son estadísticamente significativos en los arrastres O/A.

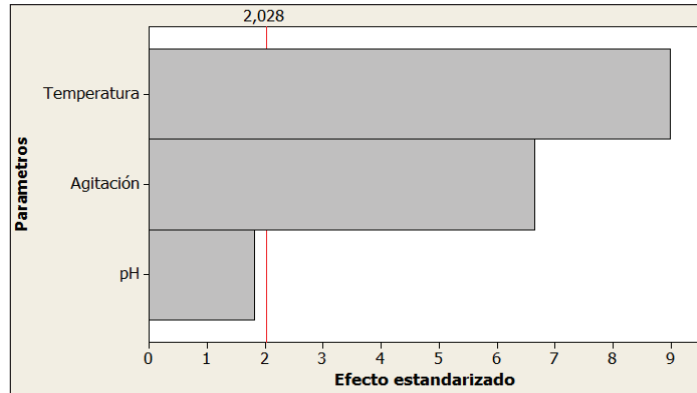


Figura 99: Diagrama de Pareto del reactivo Lix 612 NLV

Se observa en la Figura 96 que la temperatura y la agitación sobrepasan la línea de referencia, por lo tanto estos parámetros sí son estadísticamente significativos en los arrastres O/A.

En el caso de las aldoximas, ya sean aldoximas puras o aldoximas modificadas, la agitación y temperatura son estadísticamente significativas en los arrastres O/A.

4.5. Modelación estadística de arrastres O/A

4.5.1. Planteamiento de la hipótesis

Para el desarrollo del modelo de medias $Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$ se estableció las siguientes hipótesis:

$$\text{Hipotesis Nula} \quad H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_n \quad 4.1$$

$$\text{Hipotesis Alternativa} \quad H_1: \text{Alguna diferencia existe} \quad 4.2$$

$$\text{Hipotesis Nula} \quad H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_n \quad 4.3$$

$$\text{Hipotesis Alternativa} \quad H_1: \text{Alguna diferencia existe} \quad 4.4$$

$$\text{Hipotesis Nula} \quad H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todo } ij \quad 4.5$$

$$\text{Hipotesis Alternativa} \quad H_1: \text{Al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad 4.6$$

Se debe comprobar que los supuestos del modelo, que establecen que los residuos y/o errores, deben ser:

- Independientes
- Idénticamente distribuidos normalmente
- Media cero y varianza constante

Deben cumplirse, para que el modelo tenga validez estadística.

4.5.2. Ecuación del modelo de medias para los reactivos

La unidad del arrastre es en ppm, es decir mL de orgánico arrastrado por m³ de solución.

Ecuación para el reactivo Lix 8180

$$\text{Arrastre O/A} = 54,7 - 15,2 \text{ Temperatura} - 5,55 \text{ pH} + 14,6 \text{ Agitación} \quad (4.5)$$

Tabla 11: Resultados de coeficientes de correlación del reactivo Lix 8180

Predictor	Coef	Coef Se	T	P
Constante	54,671	1,997	27,400	0,000
Temperatura	-15,180	1,997	-7,600	0,000
pH	-5,555	1,997	-2,780	0,009
Agitación	14,617	1,997	7,320	0,000
S = 12,631	R-cuad. =	76,80%	R-cu ad.(ajustado) =	74,90%

Ecuación para el reactivo Lix 84 I

$$\text{Arrastre O/A} = 9,69 - 2,64 \text{ Temperatura} - 1,73 \text{ pH} + 3,55 \text{ Agitación} \quad (4.6)$$

Tabla 12: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 84 I

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	9,692	0,393	24,620	0,000
Temperatura	-2,638	0,393	-6,700	0,000
pH	-1,731	0,393	-4,400	0,000
Agitación	3,548	0,393	9,010	0,000
S = 2,489	R-cuad. =	80,2%	R-cuad.(ajustado) =	78,5%

Ecuación para el reactivo Lix 9790 N

$$\text{Arrastre O/A} = 22,1 - 6,04 \text{ Temperatura} - 2,07 \text{ pH} + 9,29 \text{ Agitación} \quad (4.7)$$

Tabla 13: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 9790 N

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	21,437	1,233	17,390	0,000
Temperatura	-7,106	1,233	-5,760	0,000
pH	-2,943	1,233	-2,390	0,022
Agitación	8,823	1,233	7,160	0,000
S = 7,797		R-cua d. = 71,5%		R-cuad.(ajustado) = 69,1%

Ecuación para el reactivo Lix 984 N

$$\text{Arrastre O/A} = 28,8 - 10,2 \text{ Temperatura} - 3,35 \text{ pH} + 7,14 \text{ Agitación} \quad (4.8)$$

Tabla 14: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 984 N

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	28,785	1,076	26,760	0,000
Temperatura	-10,163	1,076	-9,450	0,000
pH	-3,349	1,076	-3,110	0,004
Agitación	7,143	1,076	6,640	0,000
S = 6,803		R-cuad. = 79,9%		R-cuad.(ajustado) 78,2%

Ecuación para el reactivo Lix 860 NI

$$\text{Arrastre O/A} = 55,8 - 19,7 \text{ Temperatura} - 11,4 \text{ pH} + 17,1 \text{ Agitación} \quad (4.9)$$

Tabla 15: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 860 NI

Predictor	Coef	Coef SE	T	P
Constante	55,769	1,756	31,760	0,000
Temperatura	-19,664	1,756	-11,200	0,000
pH	-11,445	1,756	-6,520	0,000
Agitación	17,142	1,756	9,760	0,000
S = 11,104		R-cuad. = 88%		R-cuad.(ajustado) = 87,0%

Ecuación para el reactivo Lix 860 I

$$\text{Arrastre O/A} = 44,8 - 21,5 \text{ Temperatura} - 8,86 \text{ pH} + 17,3 \text{ Agitación} \quad (4.10)$$

Tabla 16: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 860 I

Predictor	Coef	Coef SE	T	P
Constante	44,789	1,843	24,300	0,000
Temperatura	-21,541	1,843	-11,690	0,000
pH	-8,860	1,843	-4,810	0,000
Agitación	17,293	1,843	9,380	0,000
S = 11,655	R-cuad. = 87,30%		R-cuad.(ajustado) = 86,3%	

Ecuación para el reactivo Acorga 5640

$$\text{Arrastre O/A} = 59,9 - 15,7 \text{ Temperatura} - 6,44 \text{ pH} + 18,9 \text{ Agitación} \quad (4.11)$$

Tabla 17: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Acorga 5640

Predictor	Coef	Coef SE	T	P
Constante	59,95	2,024	29,610	0,000
Temperatura	-15,728	2,024	-7,770	0,000
pH	-6,439	2,024	-3,180	0,003
Agitación	18,915	2,024	9,340	0,000
S = 12,803	R-cuad. = 81,4%		R-cuad.(ajustado) = 79,9%	

Ecuación para el reactivo Lix 612 NLV

$$\text{Arrastre O/A} = 69,6 - 18,1 \text{ Temperatura} - 3,67 \text{ pH} + 13,4 \text{ Agitación} \quad (4.12)$$

Tabla 18: Resultados de coeficiente de correlación del reactivo Lix 612 NLV

Predictor	Coef	Coef SE	T	P
Constante	69,561	2,015	34,520	0,000
Temperatura	-18,105	2,015	-8,990	0,000
pH	-3,667	2,015	-1,820	0,077
Agitación	13,386	2,015	6,640	0,000
S = 12,743	R-cuad. = 78,1%		R-cuad.(ajustado) = 76,2%	

Se observa que el valor estadístico R^2 y $R^2_{(ajustado)}$ presenta valores entre 69% y 89%, en la estadística no existe un criterio explícito que considere un valor de R^2 fijo, en general se utiliza un valor superior al 85% para validar un modelo, sin embargo, esta situación es subjetiva. La variación del valor R^2 y $R^2_{(ajustado)}$ se debe a un sin número de situaciones, generalmente a que existen variables no controlables, tales como los errores de los equipos, etc.

4.5.3. Gráficas de los residuos.

A continuación se comprueban los supuestos del modelo, que los residuos y/o errores sean:

- Independientes
- Idénticamente distribuidos normalmente
- Media cero y varianza constante

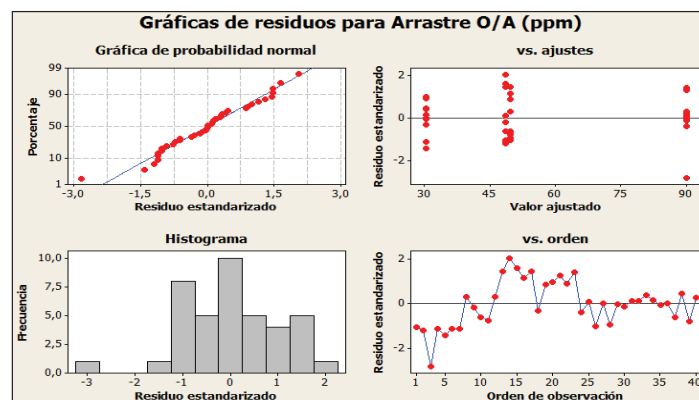


Figura 100: Gráfica de residuos del reactivo Lix 8180

La Figura 100 muestra que los residuos del modelo presentan un comportamiento normal. En el histograma se observa una asimetría negativa de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

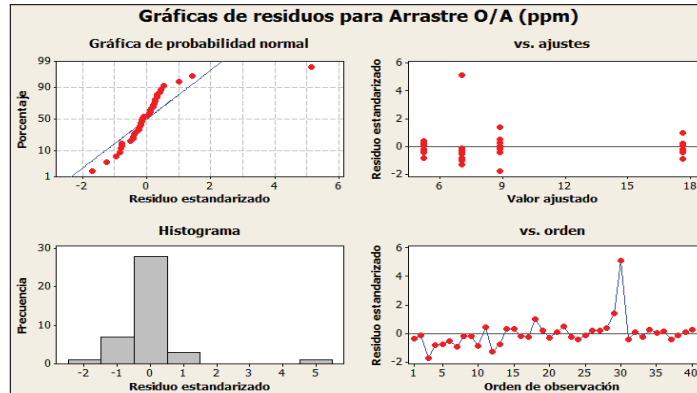


Figura 101: Grafica de residuos del reactivo Lix 84 I

La Figura 101 no presenta normalidad de los residuos, sin embargo, debido a su moderado valor se viola el supuesto de normalidad de los residuos para incluir en el modelo. En el histograma se observa una asimetría positiva de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

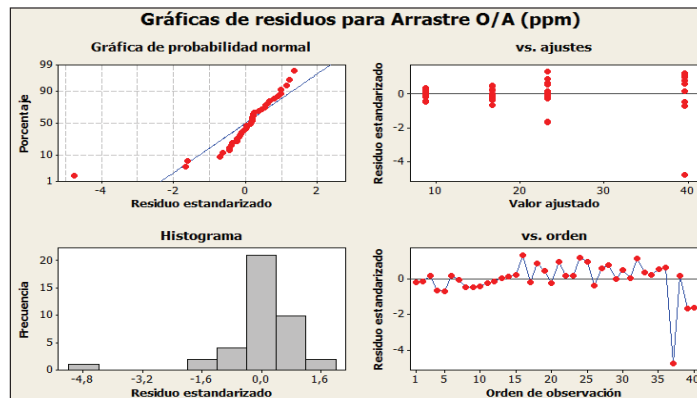


Figura 102: Grafica de residuos del reactivo Lix 9790 N

La Figura 102 muestra que no presenta normalidad de los residuos, sin embargo, debido a su moderado valor se viola el supuesto de normalidad de los residuos para incluir en el modelo. En el histograma se observa una asimetría negativa de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

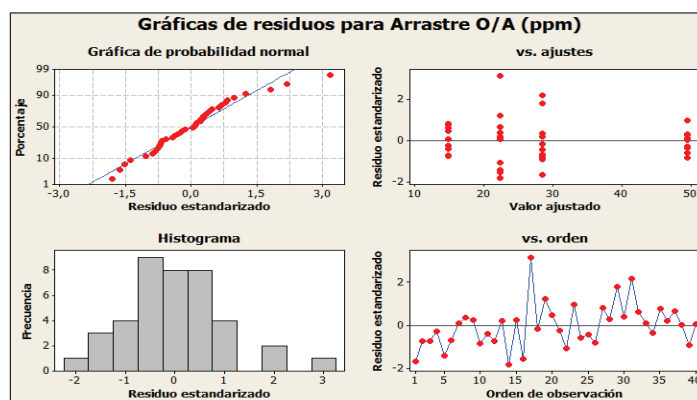


Figura 103: Grafica de residuos del reactivo Lix 984 N

La Figura 103 muestra que los residuos del modelo presentan un comportamiento normal. En el histograma se observa una asimetría positiva de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

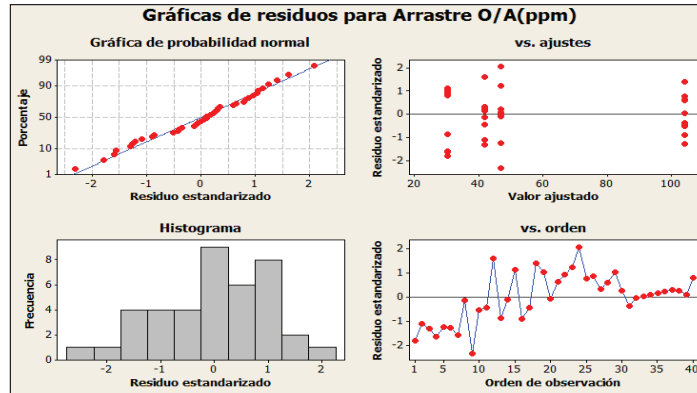


Figura 104: Grafica de residuos del reactivo Lix 860 NI

La Figura 104 muestra que los residuos del modelo presentan un comportamiento normal. En el histograma se observa una asimetría negativa de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

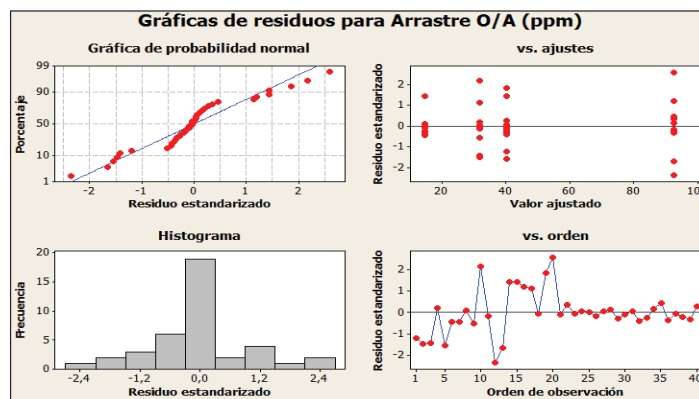


Figura 105: Grafica de residuos del reactivo Lix 860 I

La Figura 105 muestra que no presenta normalidad de los residuos, sin embargo, debido a su moderado valor se viola el supuesto de normalidad de los residuos para incluir en el modelo. En el histograma se observa curva simétrica de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

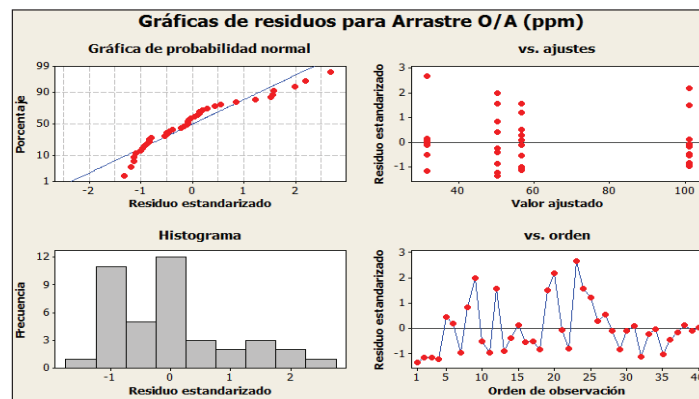


Figura 106: Grafica de residuos del reactivo Acorga 5640

La Figura 106 muestra que los residuos del modelo presentan un comportamiento normal. En el histograma se observa una asimetría positiva de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

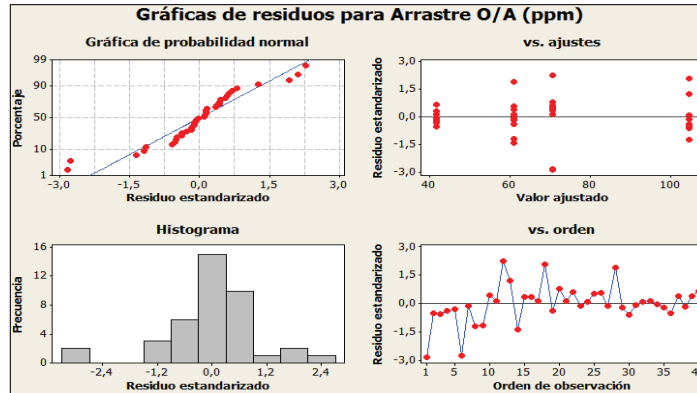


Figura 107: Grafica de residuos del reactivo Lix 612 NLV

La Figura 107 muestra que no presenta normalidad de los residuos, sin embargo, debido a su moderado valor se viola el supuesto de normalidad de los residuos para incluir en el modelo. En el histograma se observa una asimetría negativa de los datos respecto a la media. En la gráfica de residuos se observa la independencia de los residuos versus los valores ajustados. En el gráfico de orden de datos versus los residuos no se detectan patrones inusuales en los residuos.

Como se aprecia en las gráficas, existen reactivos que no cumplen con la normalidad en la distribución, sin embargo se viola ese supuesto por el moderado valor que presentan, de esta manera todas las ecuaciones del modelo de medias para los distintos extractantes son válidas estadísticamente.

5. CONCLUSIONES

- De los ocho reactivos estudiados, los niveles menores de arrastres se obtienen en la cetoxima, alcanzado un 40% y 20% inferior que las aldoximas y mezclas respectivamente.
- La ecuación del modelo de arrastre obtenida del análisis factorial para los distintos reactivos esta dado por: $Arrastre\ O/A = C - B * Temperatura - E * pH + F * Agitación$; donde C, B, E y F son constantes específicas de cada reactivo.
- El protocolo establecido para la toma de muestra del reactor desde la zona superior presenta una mayor representatividad en comparación a la toma de muestra desde la llave de paso y desde la celda de extracción.
- La densidad, viscosidad y tensión interfacial disminuyen al incrementar la temperatura.
- Los tiempos de separación de fases se incrementan a una alta agitación y baja temperatura.
- A medida que se incrementa la concentración de extractante, el nivel de arrastre O/A tiende a aumentar.
- Del diseño factorial 2^k se obtiene que los arrastres O/A son mayores en niveles máximos de temperatura, agitación y pH.
- La ecuación para cada reactivo es propio para las condiciones operacionales utilizadas, no es extrapolables a un sistema industrial.

6. RECOMENDACIONES

- Hacer un diseño factorial completo 2^k , que permita modelar los arrastres O/A en una planta piloto.
- Hacer pruebas para re-evaluar el efecto de la temperatura.
- Realizar pruebas de transferencia de cobre y arrastre de manera simultánea, para evaluar económicamente las pérdidas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ALEGRET, S. 1988. Developments in solvent extraction. Ellis Horwood, Chichester.221p.
- BOZZANO, G., DENTE., M., 2011. Modelling the drop coalescence at the interface of two liquids. Computers and Chemical Engineering, 35: 901–906.
- BROWN, L., PITT, K., 1974. Effect of impeller geometry on drop break-up in liquid - liquid system. Chemical Engineering, 27: 577 – 583.
- BROCHETTE, P., 2006. Curso emulsionante y tensoactivos. En CONGRESO MUNDIAL de emulsiones: 3 - 6 de octubre del 2006. Lyon.
- CASTELLAN, G. 1987. Físicoquímica. Massachusetts. 2da edición. Addison – Wesley.1057p.
- COGNIS CORPORATION.1998. The chemistry of metals recovery using LIX® reagent, MCT Redbook. Mining Chemical Technology Division. Tucson, AZ, USA.
- DENKOV, N., VANKOVA, N., TCHOLAKOVA, S., DANNER, T.,2007. Emulsification in turbulent flow: 3. Daugther drop-size distribution. Colloid and Interface, 3010: 570 – 589.
- DOMIC, E. 2001. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones. Universidad de Chile.1a edición. 1000p.

- GUPTA, K. 2003. Chemical metallurgy: principles and practice. Wiley-VCH. 811p.
- GUTIERREZ, L. 2001. Estudios de la separación de fases en un decantador continuo de extracción por solventes. Memoria de Ingeniero Civil Metalúrgico. Concepción, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. 16p.
- HANDBOOK OF SOLVENT EXTRACTION. 2007. Por Université Libre de Bruxelles "et al". 256p.
- ITABASHI, H. Y NAKAHARA, T. 2003. Chelation solvent extraction for separation of metal ions. Mester y Sturgeon. pp. 512 – 517.
- KUEHL, R. 2001. Diseño de experimentos principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. Diseños Factoriales. Universidad Estatal de Arizona. 2da edición. THOMSON LEARNING. pp. 175 – 225.
- KORDOSKY, G.; SIERAKOSKI, J.; House, J. 1983. The LIX®860 Series: Unmodified Copper Extraction Reagents. En: Proceedings of the International Solvent Extraction Conference, Agosto 26 - Septiembre 2 de 1983, Denver, Colorado.
- KRAUME, M., PASCHEDAG, A., WEGER, M., GÄBLER, A., 2006. The effect of pH on experimental and simulation results of transient drop size distributions in stirred liquid-liquid dispersions. Chemical Engineering, 61: 3018 – 3024.

- LE NEINDRE, B., 1993. Tensions superficielles et interfaciales. Centre National de la Recherche Scientifique. vol.K3, 475:1-12.
- MARINOVA, K., ALARGOVA, R.G., DENKOV, N.D, VELVED, O.D., PETSEV, D.N., IVANOV, I.B., BORWANKAR, R.P., 1996. Charging of oil-water interfaces due to spontaneous adsorption of hydroxyl ions. *Langmuir* 12: 2045–2051.
- MINITAB 15. 2007. Meet Minitab15 para Windows. [en línea]. Statguide de Minitab15.<http://www.minitab.com/uploadedFiles/Shared_Resources/Documents/MeetMinitab/MeetMinitabES.pdf>. [20 de agosto 2011]. pp. 29-65.
- MONTGOMERY, D. 2004. Diseño y análisis de experimento. Introducción a los diseños factoriales. Universidad Estatal de Arizona. 2da edición. Limusa Wiley. pp. 170 – 211.
- PATWARDHAN, A., MUNDADA, T., MORAB, V., SRILATHA, C., 2010. Relation between hydrodynamics and drop size distributions in pump-mix mixer. *Chemical Engineering*, 65: 3409 – 3426.
- QUÍMICA GENERAL. 2003. Por Ralph Petrucci “et al”. 8ª ed. Madrid, Prentice Hall. 1179p.
- REGHEZZA, A. 1987. Fundamentos y aplicaciones de extracción por solventes. Concepción, Universidad de Concepción. 120p.

- RIBEIRO JR, C., MEWES, D., 2006. On effect of liquid temperatura upon bubble coalescence. Chemical Engineering, 61: 5704 – 5716.
- RUIZ, M.C., LERMANDA, P., PADILLA, R., 2002. Drop size distribution in a batch mixer under breakage conditions. Hydrometallurgy, 63: 65 – 74.
- SEMIAT, R., NADIV, C., 1995. Batch settling of liquid – liquid dispersion. Chemical Engineering, 34: 2427 – 2435.
- SPENCE, J. 2000. Spence. Extractants considerations in copper sx/ew. Acorga technical note [en línea], Cytec <<https://www.cytec.com/specialty-chemicals/PDFs/CytecSolutions3.pdf>> [consulta: 15 agosto 2011].
- STAMATOUDIS, M., PACHATOURIDIS, C., GIAPOS, A., 2005. Effect of the number of impeller blades on the drop size in agitated dispersions. Chemical Engineering, 83(A12): 1425 – 1430.
- SUDDERTH, R., KORDOSKY, G. 1986. Some practical considerations in the evaluation and selection of solvent extraction reagents. Chemical agents in the mineral processing industry. Colorado. Malhotra and Riggs. pp.181-196.
- SX KINETICS, INC 2010. Entrainment O/A and A/O [en línea] <<http://www.sxkinetics.com>> [consulta: 10 diciembre 2010].
- VERA, G. 2010. Jameson Cell de Xstrata Technology como una alternativa económica para la recuperación de orgánico en planta LIX-SX-EW. Hydroprocess. Chile: Gecamin. pp12.

ANEXO A

Tablas de densidad y viscosidad a distintas concentraciones de extractante y temperaturas

Anexo A.1: Tabla de densidad y viscosidad a 10°C

Tabla 19: Densidad y viscosidad de aldoximas a 10°C

Reactivo	%v/v	Densidad (g/mL)	Viscosidad (cp)
Acorga 5640	10	0,818	2,845
	15	0,823	3,275
	20	0,828	3,524
Lix 860 NI	10	0,816	2,810
	15	0,821	3,075
	20	0,827	3,453
Lix 860 I	10	0,815	2,738
	15	0,820	2,916
	20	0,826	3,381
Lix 612 NLV	10	0,822	2,879
	15	0,824	3,346
	20	0,832	3,558

Tabla 20: Densidad y viscosidad de cetoximas a 10°C

Reactivo	%v/v	Densidad (g/mL)	Viscosidad (cp)
Lix 84 I	10	0,811	2,415
	15	0,816	2,773
	20	0,821	3,240
Lix 8180	10	0,817	2,845
	15	0,823	3,131
	20	0,826	3,489

Tabla 21: Densidad y viscosidad de mezclas a 10°C

Reactivo	%v/v	Densidad (g/mL)	Viscosidad (cp)
Lix 9790N	10	0,813	2,558
	15	0,816	2,882
	20	0,824	3,274
Lix 984N	10	0,815	2,666
	15	0,818	2,881
	20	0,825	3,310

Anexo A.2: Tabla de densidad y viscosidad a 20°C

Tabla 22: Densidad y viscosidad de las aldoximas a 20°C

Reactivo	%v/v	Densidad (g/mL)	Viscosidad (cp)
Acorga 5640	10	0,811	2,775
	15	0,816	3,062
	20	0,825	3,346
Lix 860 NI	10	0,808	2,705
	15	0,816	2,990
	20	0,823	3,239
Lix 860 I	10	0,801	2,671
	15	0,816	2,882
	20	0,822	3,131
Lix 612 NLV	10	0,812	2,847
	15	0,819	3,168
	20	0,828	3,416

Tabla 23: Densidad y viscosidad de las cetoximas a 20°C

Reactivo	%v/v	Densidad (g/mL)	Viscosidad (cp)
Lix 84 I	10	0,790	2,313
	15	0,815	2,378
	20	0,820	2,988
Lix 8180	10	0,808	2,740
	15	0,816	3,026
	20	0,824	3,238

Tabla 24: Densidad y viscosidad de las mezclas a 20°C

Reactivo	%v/v	Densidad (g/mL)	Viscosidad (cp)
Lix 9790N	10	0,793	2,349
	15	0,815	2,558
	20	0,821	3,096
Lix 984N	10	0,799	2,672
	15	0,815	2,882
	20	0,822	3,095

ANEXO B

Tabla de tensiones interfacial a distintas concentraciones de extractante, temperatura y pH

Anexo B.1: Tensión interfacial al 10% de extractante

Tabla 25: Tensión interfacial de las aldoximas al 10% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Acorga5640	1,6	15,0	14,5
	2,0	14,4	13,6
Lix 860 NI	1,6	15,5	15,0
	2,0	15,1	14,8
Lix 860 I	1,6	16,7	16,0
	2,0	16,1	15,6
Lix 612 NLV	1,6	16,5	15,6
	2,0	15,1	14,6

Tabla 26: Tensión interfacial de las cetoximas al 10% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Lix 84 I	1,6	19,3	18,5
	2,0	18,4	17,0
Lix 8180	1,6	16,7	14,7
	2,0	16,1	14,5

Tabla 27: Tensión interfacial de las mezclas al 10% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Lix 9790N	1,6	16,1	14,3
	2,0	15,5	14,2
Lix 984 N	1,6	17,6	16,8
	2,0	16,9	16,6

Anexo B.2: Tensión interfacial al 15% de extractante

Tabla 28: Tensión interfacial de las aldoximas al 15% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Acorga5640	1,6	14,6	14,1
	2,0	14,0	13,8
Lix 860 NI	1,6	15,2	14,6
	2,0	14,9	14,1
Lix 860 I	1,6	16,4	16,0
	2,0	16,1	15,8
Lix 612 NLV	1,6	15,0	14,4
	2,0	14,7	14,1

Tabla 29: Tensión interfacial de las cetoximas al 15% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Lix 84 I	1,6	17,5	16,1
	2,0	17,4	15,8
Lix 8180	1,6	15,1	15,0
	2,0	14,9	14,6

Tabla 30: Tensión interfacial de las mezclas al 15% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Lix 9790N	1,6	15,7	14,7
	2,0	15,1	14,3
Lix 984 N	1,6	17,1	16,0
	2,0	16,6	15,8

Anexo B.3: Tensión interfacial al 20% de extractante

Tabla 31: Tensión interfacial de las aldoximas al 20% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Acorga5640	1,6	14,3	14,1
	2,0	14,6	14,1
Lix 860 NI	1,6	15,7	15,4
	2,0	14,9	15,1
Lix 860 I	1,6	16,2	15,3
	2,0	16,0	14,7
Lix 612 NLV	1,6	14,7	14,0
	2,0	14,2	13,7

Tabla 32: Tensión interfacial de las cetoximas al 20% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Lix 84 I	1,6	16,4	16,2
	2,0	16,1	16,0
Lix 8180	1,6	14,1	15,0
	2,0	13,9	14,6

Tabla 33: Tensión interfacial de las mezclas al 20% de extractante

Reactivo	pH	Tensión interfacial a 10°C	Tensión interfacial a 20°C
Lix 9790N	1,6	15,0	14,8
	2,0	14,7	14,6
Lix 984 N	1,6	17,0	14,5
	2,0	16,8	14,3

ANEXO C

**Tabla de tiempo de separación de fases a
distintas concentraciones de extractante,
temperatura y agitación**

Anexo C.1: Tiempo de separación de fases a 10°C

Tabla 34: Tiempo de separación de fase al 10% v/v y 10°C

Reactivo	500 rpm	700 rpm
	C/A (s)	C/A (s)
Lix 860 NI	69	76
Lix 860 I	66	72
Acorga 5640	72	79
Lix 612 NLV	74	81
Lix 9790 N	64	70
Lix 984 N	64	72
Lix 8180	70	76
Lix 84 I	60	69

Tabla 35: Tiempo de separación de fase al 15% v/v y 10°C

Reactivo	500 rpm	700 rpm
	C/A (s)	C/A (s)
Lix 860 NI	77	88
Lix 860 I	76	87
Acorga 5640	81	91
Lix 612 NLV	92	106
Lix 9790 N	70	85
Lix 984 N	73	86
Lix 8180	78	89
Lix 84 I	72	78

Tabla 36: Tiempo de separación de fase al 20% v/v y 10°C

Reactivo	500 rpm	700 rpm
	C/A (s)	C/A (s)
Lix 860 NI	87	95
Lix 860 I	86	93
Acorga 5640	93	101
Lix 612 NLV	106	112
Lix 9790 N	83	90
Lix 984 N	85	92
Lix 8180	88	96
Lix 84 I	81	89

Anexo C.2: Tiempo de separación de fase a 20°C

Tabla 37: Tiempo de separación de fase al 10% v/v y 20°C

Reactivo	500 rpm	700 rpm
	C/A (s)	C/A (s)
Lix 860 NI	61	71
Lix 860 I	60	66
Acorga 5640	64	73
Lix 612 NLV	70	74
Lix 9790 N	58	63
Lix 984 N	60	65
Lix 8180	62	71
Lix 84 I	57	62

Tabla 38: Tiempo de separación de fase al 15% v/v y 20°C

Reactivo	500 rpm	700 rpm
	C/A (s)	C/A (s)
Lix 860 NI	69	82
Lix 860 I	67	80
Acorga 5640	71	86
Lix 612 NLV	80	91
Lix 9790 N	65	76
Lix 984 N	67	77
Lix 8180	70	83
Lix 84 I	62	72

Tabla 39: Tiempo de separación de fase al 20% v/v y 20°C

Reactivo	500 rpm	700 rpm
	C/A (s)	C/A (s)
Lix 860 NI	78	84
Lix 860 I	76	83
Acorga 5640	81	90
Lix 612 NLV	91	97
Lix 9790 N	73	82
Lix 984 N	75	82
Lix 8180	78	87
Lix 84 I	71	81

ANEXO D

Tabla de arrastre O/A a distinta temperatura, agitación y pH

Anexo D.1: Tabla de arrastre O/A a distintos pH.

Tabla 40: Arrastre O/A al 10% v/v y pH 1,6

Reactivo	pH PLS	Arrastre O/A (ppm)
Lix 8180	1,60	42,6
Lix 84 I	1,60	14,5
Lix9790N	1,60	24,2
Lix 984N	1,60	27,3
Lix 860 NI	1,60	33,2
Acorga 5640	1,60	44,6
Lix 860 I	1,60	30,0
Lix 612 NLV	1,60	54,6

Tabla 41: Arrastre O/A al 10% v/v y pH 2,0

Reactivo	pH PLS	Arrastre O/A (ppm)
Lix 8180	2,00	57,0
Lix 84 I	2,00	21,7
Lix9790N	2,00	22,3
Lix 984N	2,00	28,5
Lix 860 NI	2,00	47,1
Acorga 5640	2,00	59,3
Lix 860 I	2,00	36,1
Lix 612 NLV	2,00	64,6

Tabla 42: Arrastre O/A al 15% v/v y pH 1,6

Reactivo	pH PLS	Arrastre O/A (ppm)
Lix 8180	1,60	80,4
Lix 84 I	1,60	49,4
Lix9790N	1,60	47,7
Lix 984N	1,60	54,6
Lix 860 NI	1,60	58,6
Acorga 5640	1,60	78,9
Lix 860 I	1,60	54,6
Lix 612 NLV	1,60	87,1

Tabla 43: Arrastre O/A al 15% v/v y pH 2,0

Reactivo	pH PLS	Arrastre O/A (ppm)
Lix 8180	2,00	82,6
Lix 84 I	2,00	63,4
Lix9790N	2,00	59,6
Lix 984N	2,00	61,9
Lix 860 NI	2,00	77,5
Acorga 5640	2,00	86,1
Lix 860 I	2,00	65,0
Lix 612 NLV	2,00	140,0

Tabla 44: Arrastre O/A al 20% v/v y pH 1,6

Reactivo	pH PLS	Arrastre O/A (ppm)
Lix 8180	1,60	118,3
Lix 84 I	1,60	54,0
Lix9790N	1,60	61,9
Lix 984N	1,60	69,6
Lix 860 NI	1,60	82,9
Acorga 5640	1,60	152,1
Lix 860 I	1,60	70,4
Lix 612 NLV	1,60	185,4

Tabla 45: Arrastre O/A al 20% v/v y pH 2,0 desde celda de extracción

Reactivo	pH PLS	Arrastre O/A (ppm)
Lix 8180	2,00	149,8
Lix 84 I	2,00	83,0
Lix9790N	2,00	81,9
Lix 984N	2,00	93,5
Lix 860 NI	2,00	115,7
Acorga 5640	2,00	161,4
Lix 860 I	2,00	89,3
Lix 612 NLV	2,00	189,6

Anexo D.2: Tabla de arrastre O/A a distintas temperaturas y agitación

Tabla 46: Arrastre O/A al 10% v/v, 10°C y 500 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	500	10	15,22
Lix 84 I	500	10	3,88
Lix9790N	500	10	6,11
Lix 984N	500	10	10,10
Lix 860 NI	500	10	12,50
Acorga 5640	500	10	17,77
Lix 860 I	500	10	8,04
Lix 612 NLV	500	10	36,99

Tabla 47: Arrastre O/A al 10% v/v, 20°C y 500 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	500	20	32,98
Lix 84 I	500	20	2,88
Lix9790N	500	20	14,47
Lix 984N	500	20	20,98
Lix 860 NI	500	20	28,13
Acorga 5640	500	20	34,95
Lix 860 I	500	20	25,08
Lix 612 NLV	500	20	36,65

Tabla 48: Arrastre O/A al 10% v/v, 10°C y 700 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	700	10	34,63
Lix 84 I	700	10	4,81
Lix9790N	700	10	10,71
Lix 984N	700	10	12,05
Lix 860 NI	700	10	13,89
Acorga 5640	700	10	41,43
Lix 860 I	700	10	12,23
Lix 612 NLV	700	10	45,92

Tabla 49: Arrastre O/A al 10% v/v, 20°C y 700 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	700	20	53,70
Lix 84 I	700	20	3,85
Lix9790N	700	20	25,94
Lix 984N	700	20	33,17
Lix 860 NI	700	20	51,34
Acorga 5640	700	20	54,24
Lix 860 I	700	20	40,16
Lix 612 NLV	700	20	61,17

Tabla 50: Arrastre O/A al 15% v/v, 10°C y 500 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	500	10	26,88
Lix 84 I	500	10	5,63
Lix9790N	500	10	6,22
Lix 984N	500	10	6,25
Lix 860 NI	500	10	17,55
Acorga 5640	500	10	29,78
Lix 860 I	500	10	15,49
Lix 612 NLV	500	10	44,64

Tabla 51: Arrastre O/A al 10% v/v, 20°C y 500 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	500	20	47,19
Lix 84 I	500	20	4,33
Lix9790N	500	20	19,68
Lix 984N	500	20	30,29
Lix 860 NI	500	20	45,96
Acorga 5640	500	20	58,13
Lix 860 I	500	20	39,73
Lix 612 NLV	500	20	74,11

Tabla 52: Arrastre O/A al 15% v/v, 10°C y 700 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	700	10	43,75
Lix 84 I	700	10	9,62
Lix9790N	700	10	14,68
Lix 984N	700	10	17,79
Lix 860 NI	700	10	38,83
Acorga 5640	700	10	50,77
Lix 860 I	700	10	29,87
Lix 612 NLV	700	10	59,60

Tabla 53: Arrastre O/A al 15% v/v, 20°C y 700 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
Lix 8180	700	20	89,26
Lix 84 I	700	20	5,29
Lix9790N	700	20	46,63
Lix 984N	700	20	47,66
Lix 860 NI	700	20	71,16
Acorga 5640	700	20	91,96
Lix 860 I	700	20	70,15
Lix 612 NLV	700	20	96,88

Tabla 54: Arrastre O/A al 20% v/v, 10°C y 500 rpm

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
LIX 8180	500	10	41,83
Lix 84 I	500	10	9,57
Lix9790N	500	10	11,06
Lix 984N	500	10	19,60
Lix 860 NI	500	10	41,38
Acorga 5640	500	10	56,70
Lix 860 I	500	10	29,34
Lix 612 NLV	500	10	62,77

Tabla 55: Arrastre O/A al 20% v/v, 20°C y 500 rpm desde reactor

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
LIX 8180	500	20	65,38
Lix 84 I	500	20	24,47
Lix9790N	500	20	34,86
Lix 984N	500	20	52,17
Lix 860 NI	500	20	64,29
Acorga 5640	500	20	71,86
Lix 860 I	500	20	58,35
Lix 612 NLV	500	20	86,61

Tabla 56: Arrastre O/A al 20% v/v, 10°C y 700 rpm desde reactor

Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
LIX 8180	700	10	69,64
Lix 84 I	700	10	17,55
Lix9790N	700	10	30,29
Lix 984N	700	10	36,61
Lix 860 NI	700	10	63,78
Acorga 5640	700	10	73,62
Lix 860 I	700	10	50,00
Lix 612 NLV	700	10	76,28

Tabla 57: Arrastre O/A al 20% v/v, 20°C y 700 rpm desde reactor

20% Extractante			
Reactivo	Agitación (rpm)	Temperatura (°C)	Arrastre (ppm)
LIX 8180	700	20	121,07
Lix 84 I	700	20	43,62
Lix9790N	700	20	60,53
Lix 984N	700	20	83,97
Lix 860 NI	700	20	114,73
Acorga 5640	700	20	123,56
Lix 860 I	700	20	113,46
Lix 612 NLV	700	20	125,00

ANEXO E

Tabla de tiempo medio de separación de fase de orgánicos a 10°C y 20 °C

Anexo E.1: Tiempo medio de separación de fase a 10°C

Tabla 58: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 NI

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	24	24	24	31	32	32
2	35	33	34	42	43	43
3	49	49	49	58	60	59
4	68	69	69	73	78	76

Tabla 59: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 NI

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	25	24	25	30	31	31
2	32	32	32	40	41	41
3	48	44	46	56	56	56
4	77	76	77	87	88	88

Tabla 60: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 NI

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	28	29	29	32	35	34
2	37	38	38	43	46	45
3	50	52	51	58	60	59
4	87	86	87	94	95	95

Tabla 61: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	26	25	26	29	26	28
2	34	34	34	37	33	35
3	46	47	47	50	43	47
4	67	64	66	73	70	72

Tabla 62: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	28	28	28	28	30	29
2	34	36	35	39	38	39
3	50	51	51	59	58	59
4	74	78	76	86	87	87

Tabla 63: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 860 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	29	29	29	30	31	31
2	40	40	40	40	40	40
3	57	56	57	61	62	62
4	86	85	86	94	92	93

Tabla 64: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Acorga 5640

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	26	25	26	34	32	33
2	38	36	37	47	44	46
3	52	51	52	56	55	56
4	72	71	72	79	78	79

Tabla 65: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Acorga 5640

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	27	29	28	34	32	33
2	40	40	40	47	46	47
3	51	50	51	60	61	61
4	80	81	81	90	92	91

Tabla 66: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Acorga 5640

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	29	30	30	35	36	36
2	37	36	37	41	41	41
3	54	56	55	60	61	61
4	92	93	93	101	100	101

Tabla 67: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 612 NLV

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	17	17	17	23	23	23
2	27	27	27	33	33	33
3	43	43	43	47	47	47
4	75	73	74	81	80	81

Tabla 68: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 612 NLV

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	24	28	26	42	35	39
2	36	40	38	57	45	51
3	60	60	60	65	60	63
4	92	92	92	108	103	106

Tabla 69: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 612 NLV

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	26	26	26	29	29	29
2	38	38	38	39	39	39
3	51	51	51	58	58	58
4	106	106	106	112	112	112

Tabla 70: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 9790 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	22	22	22	26	25	26
2	31	31	31	37	36	37
3	46	46	46	50	50	50
4	64	63	64	70	70	70

Tabla 71: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 9790 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	25	24	25	33	33	33
2	37	32	35	45	45	45
3	44	43	44	60	60	60
4	69	70	70	83	86	85

Tabla 72: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 9790 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	26	28	27	33	33	33
2	36	39	38	44	44	44
3	51	51	51	57	57	57
4	81	85	83	90	89	90

Tabla 73: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 984 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	23	23	23	25	24	25
2	32	31	32	34	36	35
3	43	40	42	43	44	44
4	65	62	64	71	73	72

Tabla 74: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 984 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	24	25	25	30	29	30
2	36	36	36	39	37	38
3	46	46	46	50	51	51
4	72	73	73	85	87	86

Tabla 75: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 984 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	30	31	31	33	31	32
2	39	39	39	42	40	41
3	49	44	47	50	54	52
4	85	85	85	93	91	92

Tabla 76: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 8180

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	24	25	25	31	30	31
2	34	36	35	41	39	40
3	47	50	49	57	52	55
4	69	70	70	77	75	76

Tabla 77: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 8180

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	29	28	29	35	32	34
2	40	37	39	47	40	44
3	55	54	55	61	57	59
4	78	77	78	88	89	89

Tabla 78: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 8180

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	28	28	28	34	36	35
2	37	37	37	46	47	47
3	57	58	58	62	63	63
4	88	88	88	96	96	96

Tabla 79: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 10°C del reactivo Lix 84 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	22	22	22	21	24	23
2	30	30	30	32	34	33
3	39	39	39	46	47	47
4	60	60	60	68	69	69

Tabla 80: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 10°C del reactivo Lix 84 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	23	27	25	25	24	25
2	30	36	33	34	34	34
3	41	45	43	47	49	48
4	72	71	72	78	77	78

Tabla 81: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 10°C del reactivo Lix 84 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	25	26	26	28	27	28
2	35	37	36	39	40	40
3	51	52	52	56	55	56
4	81	80	81	88	89	89

Anexo E.2: Tiempo medio de separación de fase a 20°C

Tabla 82: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 NI

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	21	23	22	26	26	26
2	29	32	31	35	35	35
3	40	42	41	49	51	50
4	60	61	61	70	71	71

Tabla 83: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 NI

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	24	20	22	25	26	26
2	34	30	32	33	33	33
3	43	43	43	52	53	53
4	68	69	69	82	81	82

Tabla 84: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 NI

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	22	23	23	33	34	34
2	31	31	31	43	43	43
3	45	46	46	54	56	55
4	78	77	78	83	85	84

Tabla 85: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	22	20	21	24	28	26
2	29	27	28	31	36	34
3	43	40	42	44	49	47
4	58	61	60	65	66	66

Tabla 86: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	23	23	23	28	28	28
2	31	31	31	34	36	35
3	44	45	45	50	54	52
4	66	67	67	80	79	80

Tabla 87: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 860 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	26	28	27	28	28	28
2	35	37	36	39	38	39
3	48	47	48	51	50	51
4	76	76	76	82	83	83

Tabla 88: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Acorga 5640

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	19	20	20	26	27	27
2	27	28	28	38	39	39
3	44	43	44	49	50	50
4	64	63	64	73	72	73

Tabla 89: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Acorga 5640

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	18	20	19	26	27	27
2	26	28	27	36	37	37
3	35	37	36	51	50	51
4	70	72	71	85	86	86

Tabla 90: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Acorga 5640

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	29	26	28	28	28	28
2	35	33	34	34	36	35
3	46	43	45	50	54	52
4	80	81	81	90	89	90

Tabla 91: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 612 NLV

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	18	18	18	21	22	22
2	25	25	25	28	28	28
3	36	36	36	40	43	42
4	70	70	70	73	75	74

Tabla 92: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 612 NLV

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	20	19	20	24	23	24
2	27	25	26	32	32	32
3	39	37	38	45	45	45
4	79	80	80	91	91	91

Tabla 93: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 612 NLV

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	25	25	25	26	27	27
2	33	33	33	35	38	37
3	47	47	47	56	54	55
4	90	91	91	98	96	97

Tabla 94: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 9790 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	21	20	21	25	24	25
2	27	25	26	35	33	34
3	36	36	36	47	44	46
4	58	58	58	62	63	63

Tabla 95: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 9790 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	20	20	20	21	21	21
2	30	30	30	36	38	37
3	40	41	41	47	47	47
4	63	67	65	75	76	76

Tabla 96: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 9790 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	22	22	22	25	27	26
2	31	31	31	38	37	38
3	46	47	47	49	49	49
4	70	75	73	80	83	82

Tabla 97: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 984 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A	C/A.	C/A.	Prom. C/A
1	20	22	21	24	26	25
2	25	30	28	32	34	33
3	32	40	36	39	44	42
4	59	60	60	64	66	65

Tabla 98: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 984 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	25	24	25	26	26	26
2	34	36	35	37	36	37
3	43	44	44	47	45	46
4	68	66	67	78	76	77

Tabla 99: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 984 N

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	26	26	26	28	29	29
2	36	36	36	38	36	37
3	46	46	46	49	50	50
4	75	74	75	83	81	82

Tabla 100: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 8180

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	27	26	27	27	26	27
2	35	33	34	35	35	35
3	44	45	45	47	46	47
4	62	61	62	71	70	71

Tabla 101: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 8180

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	26	28	27	25	28	27
2	35	32	34	31	35	33
3	47	48	48	49	50	50
4	70	69	70	83	82	83

Tabla 102: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 8180

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	27	28	28	28	29	29
2	37	36	37	36	39	38
3	58	60	59	59	60	60
4	77	79	78	85	88	87

Tabla 103: Tiempo medio separación de fase al 10% v/v y 20°C del reactivo Lix 84 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	19	19	19	23	23	23
2	28	26	27	32	31	32
3	39	38	39	44	43	44
4	58	55	57	60	64	62

Tabla 104: Tiempo medio separación de fase al 15% v/v y 20°C del reactivo Lix 84 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	23	20	22	23	20	22
2	31	27	29	31	30	31
3	42	37	40	42	44	43
4	61	62	62	70	73	72

Tabla 105: Tiempo medio separación de fase al 20% v/v y 20°C del reactivo Lix 84 I

Punto	500 rpm			700 rpm		
	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)	C/A.	C/A.	Prom. C/A (s)
1	23	24	24	26	25	26
2	31	32	32	37	38	38
3	47	49	48	50	51	51
4	70	72	71	80	81	81