



Universidad Católica del Norte  
ver más allá



Escuela de Negocios Mineros  
Dirección de Postgrado

# **EVALUAR ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN FINAL PARA EFLUENTES DE FUNDICIÓN CON CONTENIDOS ARSENICALES**

*Proyecto de tesis para optar al grado académico de  
Magíster en Gestión Minera.*

*Profesor Guía: Oscar Benavente.*

**LUIS BUSTAMANTE  
CARLOS ESPINOZA  
PEDRO SANDOVAL**

*Antofagasta, Chile*

*2015*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	5
INTRODUCCIÓN .....	7
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....	9
1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS EFLUENTES DE PLANTAS DE ACIDO.....	11
1.2. PROCESOS CONOCIDOS DE ABATIMIENTO DE ARSÉNICO PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES. ....	11
1.3. PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES UTILIZADOS EN OTRAS COMPAÑÍAS .....	12
1.3.1. PRODUCCIÓN DE FERRIHIDRITA .....	13
1.3.2. PRODUCCIÓN DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO CON CONVERSIÓN TÉRMICA A FASE CRISTALINA. ....	15
1.3.3. PRODUCCIÓN DE ESCORODITA A PRESIÓN TÉRMICA. ....	16
1.4. ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS COMPUESTOS DE ARSÉNICO .....	17
1.5. TRATAMIENTO DE EFLUENTES EN COMPAÑÍAS CON PLANTAS DE ACIDO .....	20
1.5.1. PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES UTILIZADOS EN CODELCO 20	
1.5.1.1. PROCESO ATP DE DIVISIÓN CHUQUICAMATA .....	20
1.5.1.2. PROCESO ETP DIVISIÓN EL TENIENTE.....	22
1.5.2. PROCESO EN ALTONORTE.....	24
1.6. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE ARSÉNICO Y SUS PATENTES DE INVENCIÓN ..	27
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA .....	29
FORMULACIÓN GENERAL.....	29
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	32
HIPÓTESIS .....	33
OBJETIVOS .....	34
2.4.1. OBJETIVO GENERAL .....	34
2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	34
TIPO DE ESTUDIO .....	35
CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN .....	37
3.1. EVALUAR TÉCNICA Y ECONÓMICAMENTE LA APLICACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL QUE CUMPLA CON LA NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE. ....	37
3.2. ALTERNATIVAS SELECCIONADAS PARA ANÁLISIS COMPARATIVO .....	39
3.2.1. PROCESO ATP/ARSENITO DE CALCIO.....	39
3.2.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES .....	39
3.2.1.1.1. ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS. ....	39
3.2.1.1.2. OXIDACIÓN Y ADICIÓN DE SOLUCIÓN FÉRRICA.....	39
3.2.1.1.3. PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO .....	40
3.2.1.1.4. ESPESAMIENTO DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO. ....	40

3.2.2.	PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA ARSENITO/ARSENATO.....	41
3.2.2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES .....	43
3.2.2.1.1.	ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS. ....	43
3.2.2.1.2.	NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN DE METALES .....	44
3.2.2.1.3.	ESPESAMIENTO DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN DE METALES	45
3.2.2.1.4.	FILTRACIÓN DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN DE METALES	45
3.2.2.1.5.	SECADO Y CALCINACIÓN DEL RESIDUO ARSENICAL.....	46
3.2.3.	PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FERRIHIDRITA.....	48
3.2.3.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES .....	49
3.2.3.1.1.	ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS. ....	49
3.2.3.1.2.	OXIDACIÓN Y ADICIÓN DE SOLUCIÓN FÉRRICA.....	50
3.2.3.1.3.	PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO .....	50
3.2.3.1.4.	ESPESAMIENTO DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO. ....	51
3.2.3.1.5.	FILTRACIÓN DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO.....	52
3.2.3.1.6.	NEUTRALIZACIÓN FINAL DE LÍQUIDO CLARO. ....	52
3.2.3.1.7.	ESPESAMIENTO DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN .....	53
3.2.4.	PRODUCCIÓN DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO CON CONVERSIÓN TÉRMICA (ESCORODITA) .....	55
3.2.4.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES .....	56
3.2.4.1.1.	ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS. ....	56
3.2.4.1.2.	OXIDACIÓN Y ADICIÓN DE SOLUCIÓN FÉRRICA.....	57
3.2.4.1.3.	PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO .....	57
3.2.4.1.4.	ESPESAMIENTO DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO. ....	58
3.2.4.1.5.	CONVERSIÓN TÉRMICA DE PRECIPITADO FÉRRICO.....	59
3.2.4.1.6.	CONVERSIÓN TÉRMICA DE PRECIPITADO FÉRRICO.....	59
3.2.4.1.7.	NEUTRALIZACIÓN FINAL DE LÍQUIDO CLARO. ....	60
3.2.4.1.8.	ESPESAMIENTO DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN .....	60
3.3.	COSTOS DE INVERSIÓN, CAPEX.....	64
3.3.1.	ALTERNATIVA 1: PROCESO ATP/ARSENITO DE CALCIO .....	64
3.3.2.	ALTERNATIVA 2: PROCESO ETP/ARSENITO + ARSENIATO .....	66
3.3.3.	ALTERNATIVA 3: PROCESO ECOMETALES/FERRIHIDRITA .....	68
3.3.4.	ALTERNATIVA 4: PROCESO OUTOTEC ESCORODITA .....	70
3.4.	COSTOS OPERACIONALES, OPEX.....	73
3.4.1.	ALTERNATIVA 1: PROCESO ATP/ARSENITO DE CALCIO .....	74
3.4.2.	ALTERNATIVA 2: PROCESO ETP/ARSENITO + ARSENIATO .....	76
3.3.5.	ALTERNATIVA 3: PROCESO ECOMETALES/FERRIHIDRITA .....	78

3.3.6. ALTERNATIVA 4: PROCESO OUTOTEC ESCORODITA .....	80
CONCLUSIONES .....	83
BIBLIOGRAFÍA .....	86

## RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es evaluar los procesos actuales de tratamiento de efluentes arsenicales y su disposición final, que son utilizados en el proceso minero, para proponer una propuesta viable para el caso de Fundición Altonorte desde una mirada técnica, económica, legal y sustentable en el tiempo.

En la actualidad las operaciones de las fundiciones de cobre se han visto afectadas por la calidad de los concentrados, denominados concentrados complejos, estos poseen altos contenidos de impurezas en especial Arsénico el que principalmente se va en la corriente gaseosa y que es abatido en las plantas de ácido, en que es recuperado en una solución denominada efluente, el que posteriormente debe ser tratado para su disposición final, estos procesos de captura de gases y abatimiento de Arsénico se deben realizar, ya que las fundiciones, están reguladas por decreto ley de la República de Chile para la emisión de contaminantes a la atmosfera en especial el caso del Arsénico. Actualmente Altonorte envía sus efluentes arsenicales en forma de PLS a la minera Lomas Bayas en la eventualidad que los organismos gubernamentales se pongan más restrictivos tanto en el transporte, confinamiento, emisión, Altonorte deberá contar con alguna alternativa viable para procesar sus efluentes arsenicales. Lo anterior lleva a una revisión y estudio del estado del arte de los procesos de tratamiento de efluentes tanto en Chile como en el mundo, de esta revisión se puede concluir que existen procesos para el abatimiento de Arsénico en forma estable y que pueden ser aplicados en la fundición Altonorte de acuerdo a lo establecido en el objetivo.

Del análisis técnico de los procesos, se seleccionan los más viables en implementar por su factibilidad técnica y legal, los que son:

- Alternativa 1: Proceso ATP/Arsenito de Calcio
- Alternativa 2: Proceso ETP/Arsenito + Arseniato
- Alternativa 3: Proceso Ecometales/Ferrihidrita
- Alternativa 4: Proceso Outotec/Escorodita.

A estos procesos se realiza la determinación de los CAPEX y OPEX, siendo el más conveniente de implementar el proceso de ETP/Arsenito – Arseniato, la implementación en el futuro de este proceso significaría un impacto negativo en el OPEX de Altonorte de alrededor de US\$12 millones, por lo que debe plantearse la alternativa de recuperar otros componentes valiosos en el efluente, como es el Cu, Bi, Zn y Re que puedan revertir este impacto en el negocio, quedando abierta la posibilidad de realizar esto como estudio.

## INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de fundición de concentrados de cobre, se produce la emanación de gases, los cuáles son procesados primeramente en una serie de precipitadores electrostáticos secos para la recuperación de material particulado y los gases limpios son tratados posteriormente en plantas químicas para la producción de ácido sulfúrico, pero la operación de estas plantas genera un efluente líquido ácido, que contiene arsénico como principal elemento contaminante. Se suma a esto que las minas cada vez están generando concentrados más complejos (altos niveles de impurezas), que son atractivos para las fundiciones por el alto margen de ingreso que significan versus concentrados tradicionales. Sin embargo, estas impurezas principalmente el arsénico (Agente Cancerígeno), por sus características químicas son volatilizadas, siendo eliminadas de la corriente gaseosa en las etapas de limpieza de las plantas de ácido. Si estas impurezas no son eliminadas de la corriente gaseosa pueden generar un ácido sulfúrico fuera de las especificaciones comerciales y por ende afectar al retorno de la fundición por venta de ácido. El ácido sulfúrico producido es vendido para los procesos de lixiviación en pilas y de make-up para las naves electrolíticas, por lo que es vital que este ácido sea de baja concentración de As, para no afectar los procesos de electro-obtención y electro-refinación, ya que afecta directamente la calidad de los cátodos.

A lo expuesto anteriormente se suma que el Arsénico es considerado por la Agencia Internacional de Investigaciones del Cáncer (AIRC), como un agente cancerígeno comprobado, la no eliminación del arsénico de la corriente gaseosa, puede generar que éste sea emitido a la atmósfera y generando por ende la contaminación de la población y de los recursos naturales. Por esta razón, las fundiciones están sujetas a cumplir con el Decreto Supremo N°165 (1999), que “Establece norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire”, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, y a las modificaciones de este decreto, contenidas en Decreto Supremo N° 75 que “Modifica la norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire contenida en el Decreto Supremo N° 165 del año 1999, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la

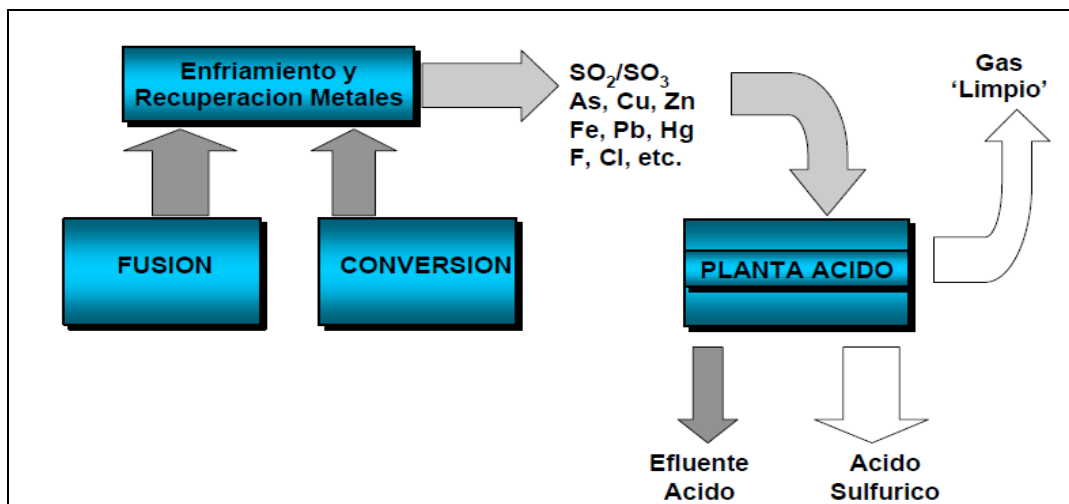
República”.

Por tal razón, las fundiciones poseen dentro de los procesos metalúrgicos de las plantas de ácido la zona limpieza de gases, que además de limpiar los gases, genera un efluente ácido que pueden llegar a tener concentraciones de 15 -19 g/l As (III), 50 - 150 g/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, estos valores están dados por las propiedades de solubilidad del Arsénico en la solución de ácido de débil, no existiendo norma para la generación de efluentes ácidos, además estos efluentes contienen pequeñas cantidades de cobre 0,3 – 1 g/l, hierro 0,1 – 1 g/l y zinc 0,1 g/l, estos efluentes deben ser tratados para mantener la continuidad operacional de la fundición.

## CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

La materia prima para la obtención de metales como el cobre, está constituida por concentrados de este metal, cada vez más complejos, que contienen metales pesados. Al fundir dichos concentrados de Cu, que contienen minerales con altos contenidos de arsénico como: arsenopiritas ( $\text{FeAsS}$ ), rejalgar ( $\text{AsS}$ ) y orpimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), se produce la volatilización de As y azufre (S) y parte de los metales pesados que conforman las emisiones gaseosas en sus formas como trióxido de arsénico y dióxido de azufre respectivamente, con el fin de evitar que estas emisiones de los hornos de fusión contaminen y para cumplir con la normativa ambiental, las fundiciones han debido implementar plantas de captura, lavado y contacto de gases, para finalmente producir ácido sulfúrico (figura N°1.1), a partir del dióxido de azufre presente en los gases.

Figura 1.1: Esquema de operación de Manejo de Gases en proceso de Fundición.

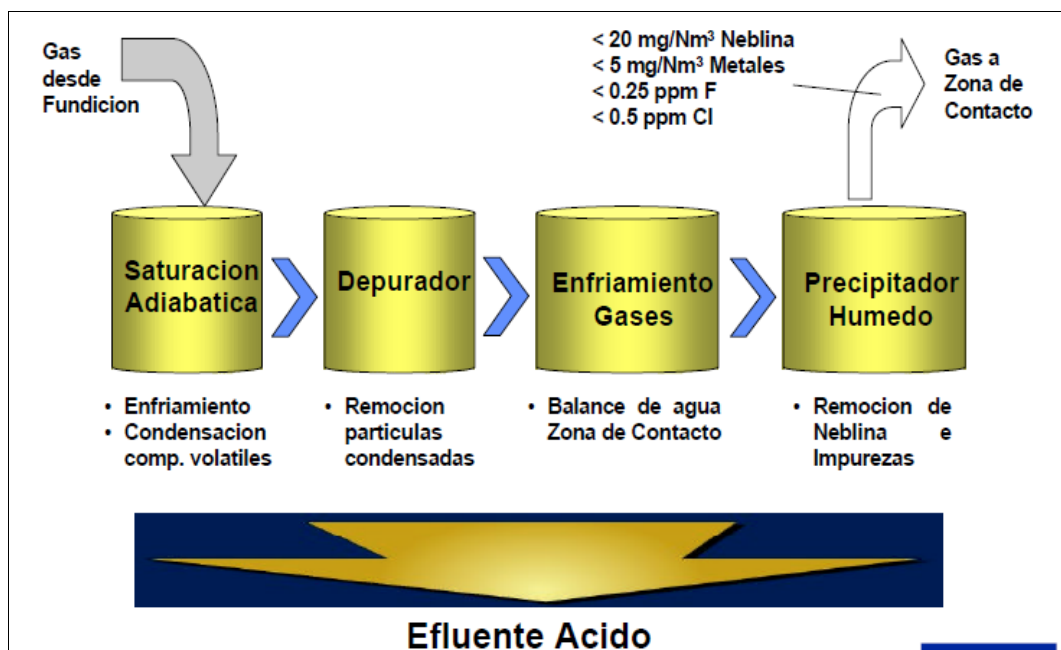


Fuente: The Acid Plant Effluent Treatment Dilemma: Which Process to Choose?, Aker Kvaerner Chemetics (2002).

Adicionalmente, en el proceso de limpieza de gases (ver Figura N°1.2) se produce la formación de un ácido sulfúrico débil, denominado efluente, con altos

contenidos de As y metales pesados, siendo el arsénico el más preocupante, debido a su alta toxicidad para los seres humanos y animales, tanto que es conocido como cancerígeno.

Figura 1.2: Esquema de operación de Limpieza de Gases Planta de Ácido



Fuente: The Acid Plant Effluent Treatment Dilemma: Which Process to Choose?, Aker Kaerner Chemetics (2002).

Cabe destacar que la disposición final o confinamiento de estos compuestos de As en suelo, debe cumplir los criterios establecidos según Decreto N°148, Ministerio de Salud, basado en el test TCLP 1311 de la EPA, que consiste en un proceso de lixiviación con una solución ácida al 5 %, a una temperatura, tiempo y equipamiento estandarizados, en que el límite de As lixiviado, no debe exceder los 5 mg/l como concentración máxima permisible (CMP).

## 1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS EFLUENTES DE PLANTAS DE ACIDO

Los efluentes provenientes de las plantas de ácido, corresponden a soluciones generadas como ácido débil de descarte de los procesos de lavado de gases metalúrgicos. Se caracterizan por su baja concentración de acidez, alto contenido de sólidos en suspensión, concentraciones variables de cobre y otros metales base e impurezas tales como arsénico, antimonio, bismuto y cloruro.

## 1.2. PROCESOS CONOCIDOS DE ABATIMIENTO DE ARSÉNICO PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES.

Existen diferentes procesos para abatir el arsénico disuelto en los efluentes de plantas de ácido, los cuales se agrupan según el tipo de operación unitaria, tal como lo indica la siguiente Tabla 1.2.1.

Tabla 1.2.1: Procesos de Abatimiento de Arsénico y productos obtenidos

OPERACIÓN UNITARIA	PRODUCTOS OBTENIDOS
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formación de Arsenitos y Arseniatos de Calcio.</li> <li>- Formación de Arsenitos y Arseniatos de Hierro.</li> <li>- Formación de Ferrihidritas Arsenicales</li> <li>- Formación de Arseno-Hidroxi-Sulfatos</li> <li>- Formación de Sulfuros de As</li> </ul>
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formación de Ferrihidritas Arsenicales</li> <li>- Gel de As en Hidróxido de Aluminio</li> <li>- Gel de As en Alumina</li> <li>- Atrapamiento en superficie de Carbón Activado.</li> </ul>

Osmosis Inversa	- Agua de rechazo con mayor porcentaje de As.
-----------------	---

Fuente: Ingeniería Conceptual Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte, (2013)

### 1.3. PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES UTILIZADOS EN OTRAS COMPAÑÍAS.

Las mayores exigencias medio ambientales aplicadas en Chile y el mundo, han impulsado la investigación de mejoras a los procesos de precipitación y estabilización de arsénico desde efluentes y soluciones ácidas, acercándose a la producción de arsenatos férricos, sulfuros y particularmente escorodita como objetivo final, tal es el caso, de los procesos hidrometalúrgicos que han sido implementados en las fundiciones de Saganoseki y Kosana en Japón para tratar el polvo generado en sus operaciones de fusión de cobre. La planta de tratamiento de Saganoseki fue construida en 1982 y permite tratar 500 t/mes de polvos de convertidores, donde el arsénico es fijado como sulfuro de arsénico, luego polimerizado y almacenado en la fundición.

La planta hidrometalurgia de la fundición Kosaka comenzó su operación en 1975, las etapas básicas del proceso son la **lixiviación del polvo** para recuperar el sulfuro de plomo, recuperación del cobre desde la solución, **precipitación de arsénico** como arseniato férrico, recuperación de cadmio como esponjas de cadmio y finalmente recuperación de zinc desde la solución de hidróxido de zinc derivados del drenaje minero ácido. El arsénico es precipitado como Arsenitos/arseniatos de fierro y zinc.

Actualmente el desarrollo se ha centrado en la optimización de la precipitación de arsénico pentavalente y el ión férrico, ya que se reconoce que las especies con arsénico pentavalente son menos tóxicas y más estables, que las especies con arsénico trivalente.

Debido a que el arsénico contenido en los Efluentes de Plantas de Acido (EPAS) está mayoritariamente en forma trivalente, obliga a considerar una etapa de oxidación

previa a la precipitación en ambiente férrico, en todas las alternativas de proceso que buscan obtener alguna forma de arsenato férrico.

A continuación, se describen 3 alternativas, que diversas compañías han explorado para implementar en el tratamiento de soluciones y efluentes ácidos con alto contenido de arsénico y que podrían resultar de interés para este estudio:

- Producción de Ferrihidrita
- Producción de Arsenato Férrico Amorfo con Conversión Térmica a Fase Cristalina
- Producción de Escorodita a Alta presión

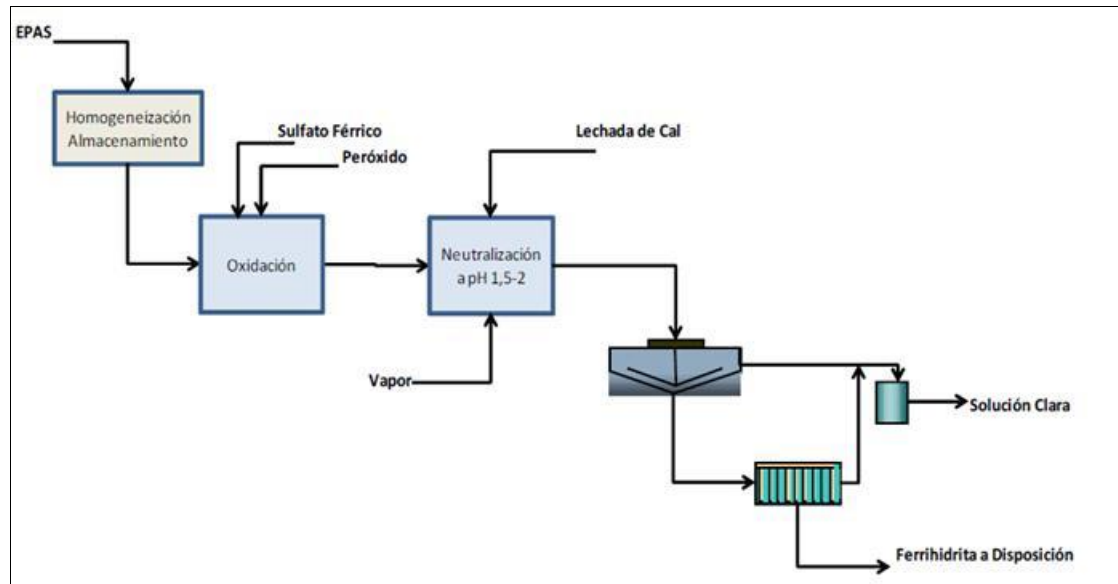
### **1.3.1. PRODUCCIÓN DE FERRIHIDRITA**

Este compuesto tiene relativamente buenas condiciones de estabilidad en el largo plazo. La obtención de este compuesto de arsénico es por lejos el método de abatimiento de efluentes ácidos más utilizado en el mundo entero. Es un hecho conocido que la incorporación de pequeñas cantidades de cationes y aniones a la matriz de la ferrihidrita reduce significativamente la recristalización de goetita ( $\text{FeO}\cdot\text{OH}$ ) o hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), previniendo la liberación de las impurezas insertas en la matriz del compuesto.

La producción de este compuesto fue catalogado por la EPA de Estados Unidos, en los primeros años de este siglo como la mejor tecnología demostrada disponible (sigla en inglés BADT). Los informes de operaciones que producen este tipo de precipitado, indican que los límites de solubilidad del test TCLP se cumplen en prácticamente todos los casos, si se aplica una razón molar de  $\text{Fe}^{+3}/\text{As}^{+5} > 4$ .

La siguiente figura 1.1.5.1 muestra un diagrama de proceso típico para la producción de ferrihidrita por precipitación.

Figura 1.3.1: Esquema de operación simplificado de producción de Ferrihidrita.

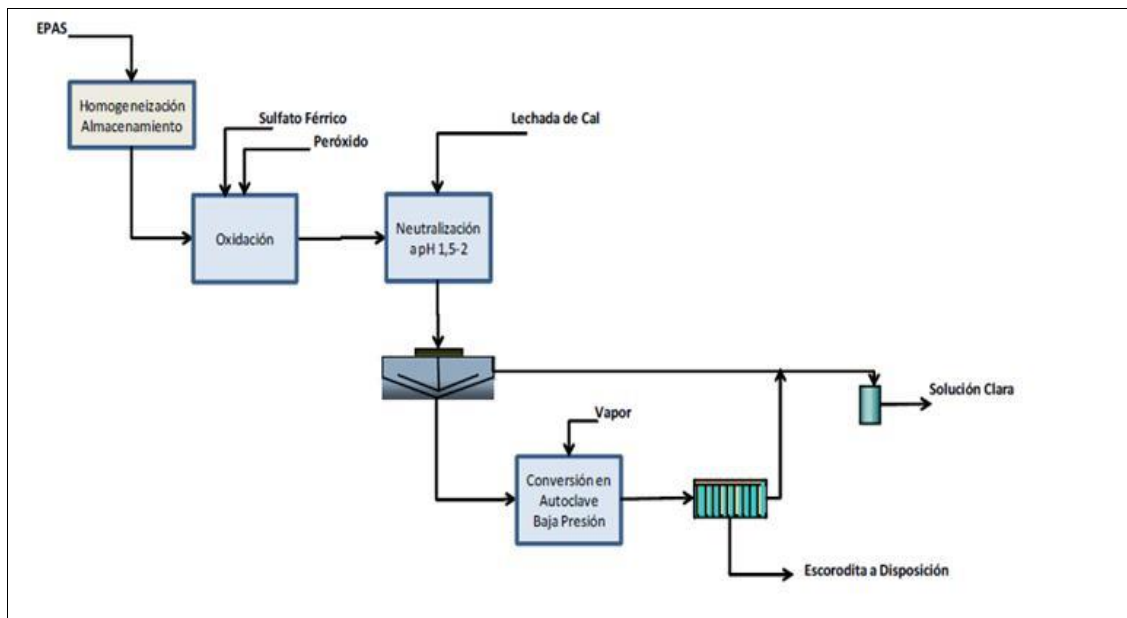


Fuente: Informe Técnico – Definición de Alternativas de Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013).

### 1.3.2. PRODUCCIÓN DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO CON CONVERSIÓN TÉRMICA A FASE CRISTALINA.

La figura 1.3.2 muestra una aplicación típica del proceso de producción de arsenato férrico con posterior conversión térmica en escorodita.

Figura 1.3.2: Esquema de operación de producción de Arsenato Férrico.



Fuente: Informe Técnico – Definición de Alternativas de Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013).

Las primeras etapas de este proceso corresponden a la adición de solución férrica y la oxidación del arsénico trivalente. La oxidación del efluente puede realizarse con peróxido de hidrógeno a temperatura ambiente en un estanque con agitador.

La precipitación de arsenato férrico amorfo a temperatura ambiente, se realiza mediante neutralización parcial del efluente ya oxidado con lechada de cal. La neutralización se realiza en una serie de estanques con agitadores, conectados en cascada y operando cada uno a pH específico y controlado. Para promover el crecimiento de las

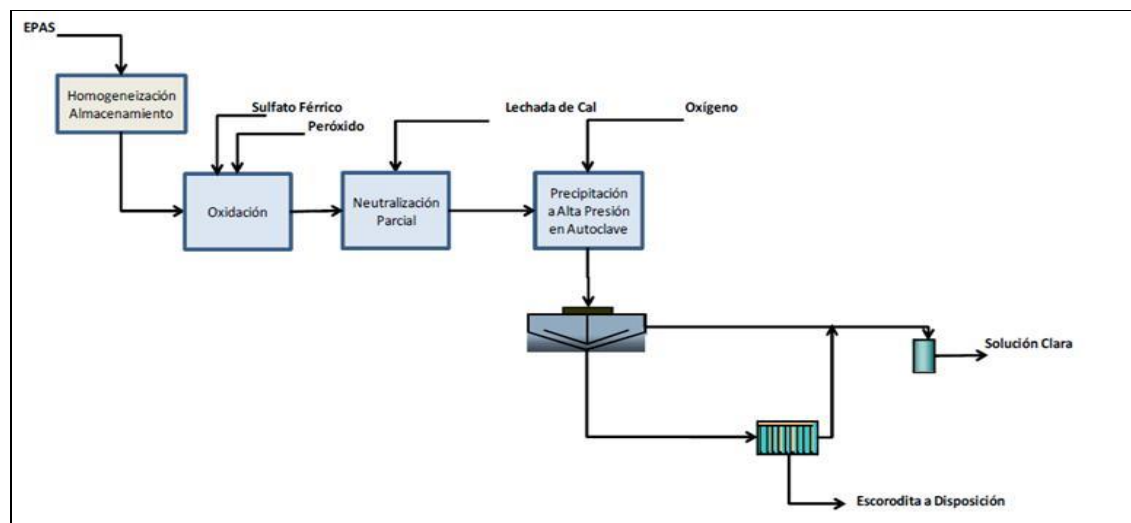
partículas de precipitado, se recircula a los reactores iniciales de la serie una fracción de la descarga (underflow) del espesador que recibe la descarga de pulpa del último reactor.

La conversión térmica a fase cristalina del precipitado arsenical se realiza en autoclaves horizontales continuos de baja presión. La pulpa de arsenato férrico amorfo se acidifica con ácido sulfúrico concentrado hasta un pH en el rango 1 - 1,5 antes de alimentarse a los autoclaves. La descarga de los autoclaves se impulsa a filtro de prensa, desde donde se descarga el arsenato férrico cristalino que se transporta a su sitio de disposición final.

### 1.3.3. PRODUCCIÓN DE ESCORODITA A PRESIÓN TÉRMICA.

La figura 2.3.3 ilustra una aplicación típica del proceso de producción de escorodita por precipitación térmica.

Figura 1.3.3: Esquema de producción de Escorodita por presión térmica.



Fuente: Informe Técnico – Definición de Alternativas de Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013)

La primera etapa de este proceso corresponde a la adición de solución férrica y mezcla con el efluente en un estanque con agitador. La idea es obtener una razón Fe/As

de 1,5 o superior. La segunda etapa es una neutralización parcial del efluente con lechada de cal. Esta neutralización se realiza en un estanque con agitador, de modo de alcanzar una concentración de ácido de 25 g/l. (Informe Técnico – Definición de Alternativas de Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013)).

La precipitación de alta presión del complejo arsenical se realiza en autoclaves horizontales continuos de alta presión. La temperatura de operación es de 150 a 200 °C (mantenida por calentamiento externo con vapor) y la presión de oxígeno es de 110 psi. La descarga de los autoclaves se realiza hacia una cámara de descompresión y desde allí hacia un estanque de descompresión flash, donde la pulpa se mantiene agitada y en suspensión para su espesamiento posterior. La pulpa de la precipitación térmica se descarga en un espesador donde se obtiene una solución desarsenificada y pulpa de descarga, que se impulsa a un filtro de prensa, desde donde se descarga el arseniato férrico cristalino que se transporta a su sitio de disposición final.

#### **1.4. ESTABILIDAD QUÍMICA DE LOS COMPUESTOS DE ARSÉNICO**

El control del arsénico en compuestos ácidos, en la mayoría de las plantas de tratamientos de efluentes que en la actualidad operan, se basa en la formación de compuestos estables de arsénico.

Estos compuestos incluyen arsenitos y arseniatos de calcio, sulfuros de arsénico, ferrihidritas arsenicales, escorodita ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). La mayoría de estos procesos son llevados a cabo mediante neutralización y posterior precipitación del Arsénico.

La estabilidad química en el largo plazo es diversa, tal como lo indican las tablas 1.4.1 y 1.4.2

Tabla 1.4.1: Compuestos de Arsénico y Consideraciones de Estabilidad en el Largo Plazo.

<b>Compuestos de Arsénico</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Unidad</b>
Arsenito y Arseniato de Calcio	$\text{Ca}(\text{AsO}_2)_2$ $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta solubilidad</li> <li>- Arseniatos pueden convertirse en <math>\text{CaCO}_3</math> y/o especies solubles de As</li> <li>- Con el tiempo el efecto tampón de Cal se reduce por disolución y carbonatación del calcio.</li> <li>- Conduce a pH más bajos e incremento de la solubilidad de arsénico</li> </ul>
Sulfuro de Arsénico	$\text{As}_2\text{S}_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Residuo formado es inestable a <math>\text{pH} &gt; 4</math></li> <li>- Se forma azufre elemental si existe <math>\text{As}^{+5}</math> en la solución.</li> </ul>
Escorias Arsenicales		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estabilidad a largo plazo desconocida.</li> <li>- Requiere condiciones específicas para incorporación de arsénico en escorias.</li> </ul>

Fuente: Informe Técnico - Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013)

Tabla 1.4.2: Compuestos de Arsénico y Consideraciones de Estabilidad en el Largo Plazo.

<b>Compuestos de Arsénico</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Unidad</b>
Ferrihidrita Arsenical	$\text{FeO.OH}_x(\text{H}_2\text{O})_6.\text{AsO}_4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La deshidratación del precipitado puede llegar a inestabilidad.</li> <li>- Puede recrystalizar a goethita o hematita.</li> <li>- Posible reducción de <math>\text{As}^{+5}</math> a <math>\text{As}^{+3}</math>.</li> <li>- Material Voluminoso con bajo contenido de arsénico.</li> </ul>
Escorodita	$\text{FeAsO}_4.2\text{H}_2\text{O}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material de alto contenido de arsénico, compacto y de muy baja solubilidad.</li> <li>-Estable en el medio ambiente.</li> </ul>

Fuente: Informe Técnico - Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013)

De entre todos los compuestos mencionados anteriormente, la escorodita es la que presenta mejores características de estabilidad química en su exposición al medio ambiente en el largo plazo. Además, tiene la mayor concentración de arsénico (menor masa de residuo por volumen de efluente tratado) y menor solubilidad en los test de control (TCLP).

## **1.5. TRATAMIENTO DE EFLUENTES EN COMPAÑÍAS CON PLANTAS DE ACIDO**

### **1.5.1. PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES UTILIZADOS EN CODELCO**

Los efluentes de plantas de ácido en las plantas metalúrgicas de Chile se procesan básicamente por neutralización con un agente alcalino, típicamente lechada de cal. Particularmente, en la División El Salvador de Codelco los Efluentes de la Planta de Acido se utilizan para las operaciones de lixiviación de la División.

A continuación, se revisa más a fondo los procesos implementados en las Divisiones de Chuquicamata y El Teniente, los que son:

- Proceso de Tratamiento de efluentes Arsenicales ATP de Chuquicamata: Neutralización con Cal en dos Etapas
- Proceso de Tratamiento de Efluentes ETP de Teniente: Precipitación en dos etapas y calcinación.

#### **1.5.1.1. PROCESO ATP DE DIVISIÓN CHUQUICAMATA**

La planta ATP dispone de piscinas de recepción de efluentes, trenes de neutralización compuestos por una etapa a pH 9 y otra a pH 11 - 12, espesadores para recepción y espesamiento de la pulpa, estanques agitados para preparación de lechada de cal y floculante, un estanque agitado para recepción y almacenamiento de pulpa desde el espesador y alimentación a los 2 filtros prensa. La siguiente figura muestra un diagrama del Proceso ATP aplicado en la División Chuquicamata (figura N°1.1.5.1).



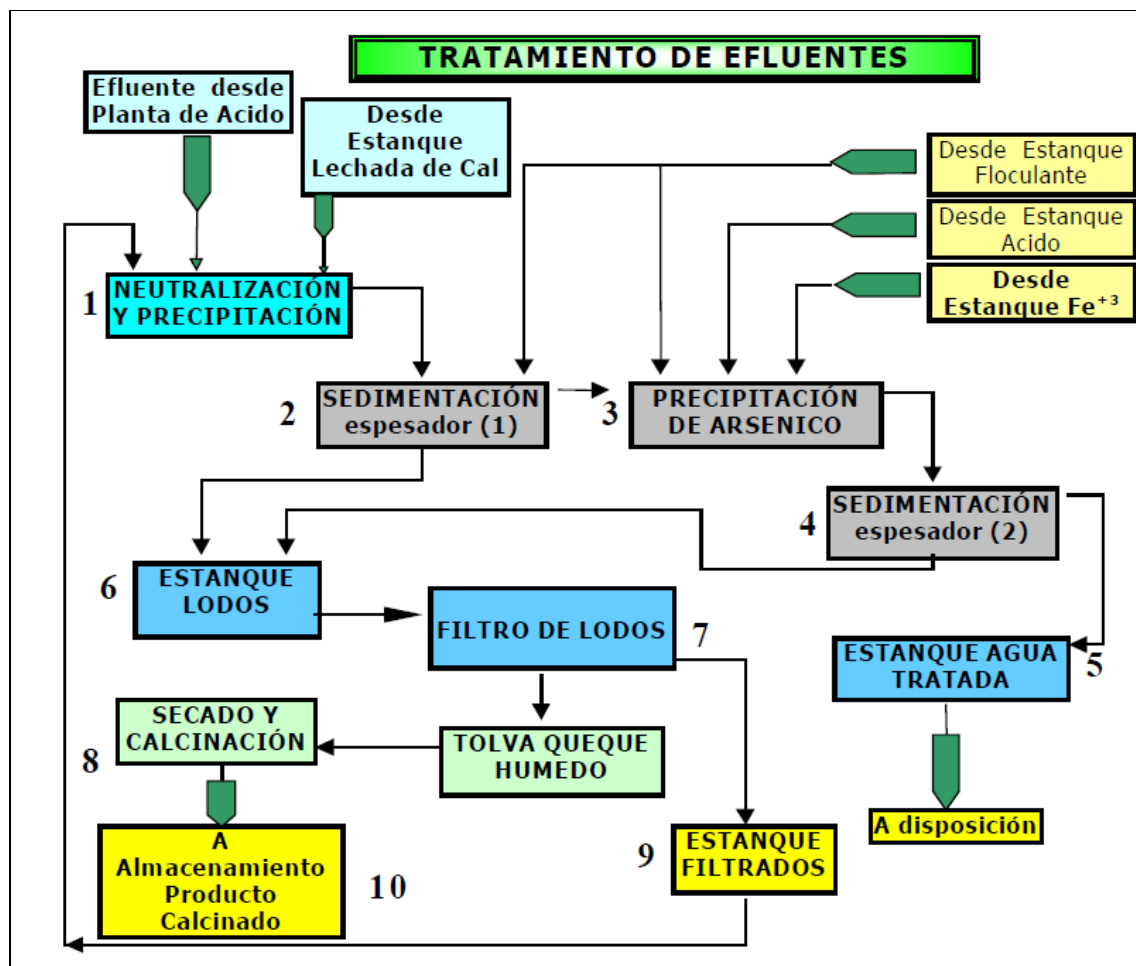
El precipitado de arsenito es esencialmente inestable en el largo plazo al estar expuesto al ambiente en un sistema húmedo, reaccionando con  $\text{CO}_2$  del aire y formando carbonato de calcio y ácido arsénico. Es por esta razón que el residuo debe ser dispuesto en un relleno de seguridad encapsulado en material plástico y cubierto de tierra.

#### **1.5.1.2. PROCESO ETP DIVISIÓN EL TENIENTE**

En la División El Teniente, específicamente en Fundición Caletones, se utiliza un proceso de precipitación a temperatura ambiente en dos etapas, que es seguido por una filtración y posteriormente por una etapa de secado y calcinación en atmósfera oxidante para aumentar la cristalinidad del precipitado. El residuo calcinado es posteriormente enviado a un botadero autorizado para tratamiento final, si se requiere y confinamiento por parte de una empresa contratista.

La planta ETP (ver Figura N° 1.5.1.2) dispone de piscinas de recepción de efluentes, trenes de precipitación compuestos por una etapa de neutralización con lechada de cal hasta pH 11- 12 y otra de precipitación férrica a pH 9 con solución de sulfato férrico, espesadores para recepción y espesamiento de la pulpa, estanques agitados para preparación y almacenamiento de lechada de cal, solución férrica y floculante, estanques agitados para recepción almacenamiento de pulpa desde espesador, filtros de prensa y hornos secadores calcinadores.

Figura 1.5.1.2: Esquema de operación de manejo de Efluentes en Caletones.



Fuente: Manual de Procesos de Planta de Tratamientos de Efluentes 2, Fundición Caletones (2003).

En la primera etapa de precipitación la solución acidulada de arsénico es neutralizada con lechada de cal hasta pH 11, con una razón de Ca/As que debe estar del orden de 4. En la segunda etapa de precipitación se utiliza solución de sulfato férrico para obtener una razón Fe/As de 7 a pH 9.

El precipitado de la planta de tratamientos de efluentes es espesado en un espesador de alta capacidad y filtrado, desde donde se obtiene un queque que contiene todo el arsénico principalmente de forma de Arsenito de calcio, con cantidades variables de arseniato de calcio y ferrihidrita arsenical. El agua recuperada, con contenido de arsénico casi nulo, es recirculada para su uso en los sistemas de enfriamiento de gases y enfriamiento de escorias.

La experiencia de la División El Teniente, muestra que los precipitados obtenidos en este proceso con razones de Ca/As superiores a 4 y etapa de calcinación a 700 °C cumplen, prácticamente en el 100% de los casos, los límites de disolución de impurezas del test TCLP, por lo que el residuo sólo requeriría de disposición final, sin necesidad de una etapa de encapsulamiento, que encarece el tratamiento (Informe Técnico – Estimación de Costos de Operación, Tratamiento de efluentes ácido y PLS Altonorte (2013).

Sin embargo, el análisis económico particular puede establecer la conveniencia de obtener precipitados de menor estabilidad, con razones de Ca/As inferiores a 4 y por tanto menos masa de precipitado, que requieren una etapa de encapsulamiento previa a la disposición final. Este análisis está definido por los costos relativos de la cal v/s el costo de encapsulamiento. Bajo este prisma actualmente El Teniente sólo realiza la etapa de secado del material, para su posterior ensacado y envío a Hidronor.

### **1.5.2. PROCESO EN ALTONORTE**

Actualmente Altonorte usa sus efluentes, que se generan en la planta de ácido, para lixiviar los polvos metalúrgicos, a partir de este proceso se produce un PLS que es enviado a Lomas Bayas para ser utilizado en las Pilas de Lixiviación.

El proceso se realiza de la siguiente forma: Los polvos de fundición se generan a diario producto de la operación del reactor Noranda, los que son transportados mediante

un sistema de transporte neumático desde una tolva receptora a la salida de los precipitadores electrostáticos (perteneciente a la línea de limpieza de gases del mismo reactor) hacia la tolva de almacenamiento de polvos de transporte neumático, que cuenta con un filtro de manga para evitar el arrastre de polvos en el aire de transporte que se descarga a la atmósfera.

Desde la tolva, los polvos provenientes del transporte neumático y maxisacos, pasan por un tornillo transportador para después ser descargados a los estanques de Lixiviación n° 1 y 2.

En el proceso de lixiviación, los polvos se contactan con una corriente de efluentes de planta de ácido y otra de ácido sulfúrico, ambas provenientes de las Plantas de Acido n°1 y 3. Además, para favorecer la remoción de los metales considerados como impurezas, se adiciona una corriente de cloruro de sodio en solución.

El proceso de lixiviación se lleva a cabo en los estanques agitados, que operan en forma paralela. Luego de aproximadamente 1 hora de tiempo de residencia, desde los estanques de lixiviación, la pulpa con un 7 a 10 % en peso de sólidos, es descargada por gravedad hacia un estanque de traspaso de pulpa.

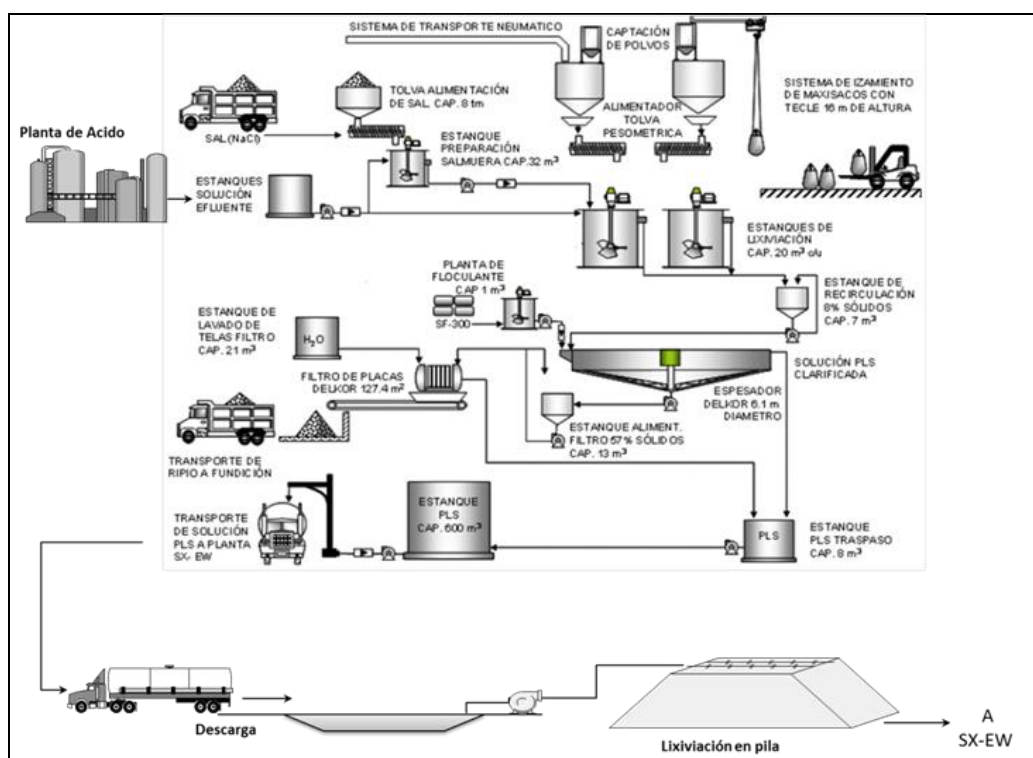
Desde el estanque de traspaso, la pulpa es bombeada hacia un espesador, donde el clarificado obtenido, se envía a estanque de traspaso PLS (pregnant leaching solution), mientras que la pulpa más concentrada se bombea hacia el estanque pulmón filtro.

En el proceso de filtrado, el sólido obtenido se envía a través de una correa transportadora al sitio de acopio de polvos lixiviados, para ser posteriormente recirculados a la fundición. Mientras que el filtrado obtenido se conduce hacia el estanque de traspaso PLS.

Finalmente, desde el estanque de traspaso, la solución obtenida es enviada al estanque de almacenamiento de PLS, para posteriormente ser retirada en camiones con destino a Lomas Bayas.

El proceso de Altonorte se aprecia en la figura 1.5.2.

Figura 1.5.2: Esquema de operación simplificado de manejo de Efluentes en Altonorte.



Fuente: Superintendencia Operaciones Plantas, Altonorte (2013)

En base a los antecedentes disponibles a la fecha, a modo de ejemplo los efluentes de las Plantas de Acido de Altonorte se generan con un caudal promedio de  $400 \text{ m}^3/\text{día}$  y composición química como se indica en la siguiente tabla 1.5.2.2.

Tabla 1.5.2.2: Composición química de efluentes de Planta de Ácido

Descripción	Unidad	Mínima	Máxima	Promedio
Volumen	M <sup>3</sup> /día	24	950	400
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	15	290	135
Cu	ppm	270	3200	1460
Cl	ppm	-	-	5000
Fe	ppm	-	-	210
S	g/l	-	-	44
As	ppm	2,800	27,100	12,600
Sb	ppm	-	-	40
Pb	ppm	-	-	12
Bi	ppm	-	-	630

Fuente: Informe Técnico - Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013)

Debido a las características indicadas en la tabla anterior, el tratamiento de este tipo de efluente se debe centrar principalmente en la neutralización de la acidez y abatimiento del arsénico en una forma estable, para lograr una solución acuosa que pueda retornarse al proceso principal (Hatch, 2013).

## 1.6. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE ARSÉNICO Y SUS PATENTES DE INVENCIÓN

Debe tenerse presente que algunos de los procesos descritos anteriormente están cubiertos en patentes de invención, que están en proceso de aprobación o han sido aprobadas en Chile y el extranjero, en los últimos años. La siguiente tabla 1.6.1 indica las patentes de invención y solicitudes de patentes de inversión que son pertinentes para estos casos

Tabla 1.6.1: Patentes y solicitudes de patentes de invención sobre Precipitación de Arsénico.

N° Patente	País	Título	Año	Autores	Comentarios
094841	Int.	Method for removal arsenic as scorodite	2010	Ruonala et al.	Outotec, Precipitación de arsenato amorfo con conversión térmica a escorodita.
44482	Chile	Procedimiento de tratamiento integral para la estabilización ambiental de efluentes líquidos y residuos sólidos con altos niveles de concentración de arsénico.	2009	Román et al.	Codelco, Tratamiento integral con lixiviación de polvos de fundición y uso de lixiviación de escoria para aportar Fe.
7314604	USA	Stable ferric arsenate precipitation from acid copper solutions whilst minimizing copper	2008	Harvey et al.	Billiton, Precipitación atmosférica de escorodita
43540	Chile	Proceso catalítico para la remoción y estabilización de As, que consta de neutralización, precipitación de sulfuros de As y metales pesados, separación, secado, disolución y oxidación del precipitado y precipitación de As (V) para formar complejo estable de Fe (III) . As (V).	2008	Herrera et al.	Universidad de Chile, Precipitación de As con sulfuro y redisolución para reprecipitar compuesto estable.
6656722	USA	Process for immobilizing arsenic waste	2003	Ruitenberget al.	Paques Bio Systems, oxidación de arsénico en solución usando bacteria oxidante
02620	Chile	Procedimiento de estabilización por conversión térmica de arseniatos férricos amorfos inestables en escorodita durante el tratamiento de efluentes arsenicales	2002	Román et al.	Aplicación de solicitud de Codelco, conversión térmica a escorodita.
6945024	USA	Method for removal of arsenic from sulphuric acid solutions	2002	Linroos et al.	Outotec, Precipitación reductiva de As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Fuente: Informe Técnico – Definición de Alternativas de Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013).

## **CAPÍTULO II: METODOLOGÍA**

### **FORMULACIÓN GENERAL**

El proyecto busca evaluar alternativas de disposición final de efluentes con altos contenidos de arsénicos, en base a su desempeño técnico-económico de forma que cumpla con la legislación y normativa ambiental vigente.

En las últimas décadas, las operaciones mineras de cobre (Cu), han visto un aumento en los contenidos de impurezas de sus menas, que se ha reflejado en la calidad de sus concentrados, que contienen una serie de metales pesados, tales como zinc (Zn), plomo (Pb), antimonio (Sb), silicio (Si), hierro (Fe), bismuto (Bi), selenio (Se), mercurio (Hg) y principalmente arsénico (As), lo que genera que los concentrados sean más complejos y más difíciles de tratar por las fundiciones de Cobre.

Del proceso de tratar los concentrados de Cu en la fundición, se generan gases metalúrgicos con alto contenido de dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), los que son conducidos hacia las plantas de ácido para la elaboración de ácido sulfúrico. Estos gases deben ser previamente limpiados, antes de entrar a las etapas posteriores de elaboración, esto con el fin de asegurar una calidad dentro de la especificación del producto final y de evitar el envenenamiento y desactivación del catalizador. Las impurezas típicas del Gas incluyen polvo, neblina ácida y gases como flúor, cloro, SO<sub>3</sub>, además de estar presentes metales como Zn, As, Sb, Bi, Co, Hg, Se, etc. La limpieza de gases se realiza poniendo en contacto la corriente de gases calientes (360 °C) en contracorriente con una solución de ácido débil de 80 a 100 g/l de ácido sulfúrico (60°C), esta solución satura el gas con agua (agua contenida en el ácido débil) mediante enfriamiento adiabático evaporativo (sin intercambio de calor con el medio exterior), esto genera que los gases se enfríen a la misma temperatura del líquido generando la eliminación de las impurezas (As, F, etc), polvo y neblina ácida. Como el ácido débil se va saturando de impurezas, es necesario purgar una fracción de este (con el fin de mantener el equilibrio de estas en la solución), esta purga del sistema de limpieza es denominada Efluente, la que es enviada a las plantas de tratamiento de efluentes (PTEF) para su tratamiento, en estas plantas se

produce la precipitación y abatimiento de su principal impureza contenida que es el As y de otros metales, como también la neutralización del ácido presente, este proceso genera materiales con altos contenidos de As y metales, los que deben ser dispuestos bajo las regulaciones ambientales existentes.

Se suma a lo anterior, una serie de cambios en la legislación, que velan por el cuidado de los trabajadores y el medioambiente, debido a las presiones de la opinión pública y a las numerosas regulaciones ambientales impuestas en el extranjero, las cuales impactan directamente en la industria minero metalúrgica, especialmente las fundiciones de cobre.

Debido a su alta toxicidad, el arsénico ha recibido mucha atención en la industria metalúrgica. Regulaciones ambientales, limitan el arsénico emitido a la atmósfera desde cada fundición (Decreto N°165, que “Establece norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire”). Como consecuencia de esto, habrá un incremento en la cantidad de residuos, los cuales deberán ser manejados en forma segura, ya sea para su neutralización o recuperación.

Aspectos importantes de este estudio radican en que el arsénico a través del tiempo ha provocado grandes impactos en la salud humana, ya que es considerado como un poderoso veneno, además de ser un conocido agente cancerígeno, por lo anterior se revisa en diversas fuentes electrónicas como por ejemplo: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/suppl7/Suppl7-19.pdf>.

En el medio ambiente reviste gran interés del punto de vista sanitario, debido a que la contaminación ambiental con arsénico también se traduce en daños a la salud.

Respecto a los daños a la salud provocados por la exposición al arsénico, consisten principalmente en que este elemento ataca sin distinción a casi todos los órganos del cuerpo humano. Las principales enfermedades conocidas al tener contacto son el cáncer a la piel, pulmón, vejiga, hígado y riñón que son causadas por la inhalación del mineral, el consumo de agua contaminada, el consumo de alimentos y la exposición

al ambiente contaminado con arsénico.

La contaminación por arsénico es un problema que afecta la zona Norte de nuestro país, desde hace décadas, por dos razones. En primer lugar la zona es naturalmente elevada en As, encontrándose en el aire, agua y suelos. Esta contaminación natural afectó la ciudad de Antofagasta y sus alrededores entre los años 1958 y 1970, período en el que se usó el agua para el consumo humano de los ríos que en forma natural presentaban altos niveles de concentración de As (Reuters, 2007). Dicho período de exposición tuvo como consecuencia que la mortalidad por cáncer al pulmón fuera 3 veces superior a lugares libres de contaminación y además se presentaran elevadas cifras de personas con cáncer estomacal y de vejiga. El período de riesgo se ha extendido por más de 20 años, incluso después de comenzar a tratar el agua contra este elemento nocivo (Bocanegra & Alvarez, 2002).

La segunda causa que hace que la zona norte de país sea el área más contaminada por arsénico en Chile, es la alta actividad minera, donde a través de la técnica conocida como Pirometalurgia se obtiene cerca del 90% del total de cobre de la zona. Esta forma de extracción es un proceso altamente contaminante, produciendo emisiones de material particulado y arsénico los que son entregados al agua y aire, en las etapas de fusión y conversión (Sancha, 1998).

## **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

- ¿Qué alternativas existen de tratamiento y disposición final de efluentes con arsénico que sean estables, técnica y económicamente sustentables y perdurables en el tiempo, de manera que permita a las fundiciones de cobre ser una alternativa real en el procesamiento de concentrados de Cu con altos contenidos de As?
- Dada la premisa anterior, se desconoce por ¿cuánto tiempo más la Compañía Minera Lomas Bayas va a seguir recibiendo efluentes con alto contenido arsenical desde Altonorte?

## HIPÓTESIS

- HIPÓTESIS EXPLICATIVAS
  - Problema 1: ¿Qué pasa con la operación de Altonorte si Lomas Bayas no recibe el efluente con contenido arsenical?
  - Hipótesis alterna: En la medida que Lomas Bayas no reciba este material la probabilidad que Altonorte paralice sus operaciones es alta.
  - Problema 2: ¿Cómo impacta en el costo operacional si Lomas Bayas no recibe el efluente con alto contenido arsenical desde Altonorte?
  - Hipótesis alterna: Altonorte deberá implementar una alternativa de tratamiento de este efluente y disposición de los residuos, con lo que deberá realizar una inversión (CAPEX) que finalmente impactará en el costo operacional (OPEX) de la fundición.

## **OBJETIVOS**

### **2.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar los procesos actuales de tratamiento de efluentes arsenicales y disposición utilizados en el proceso minero. Para lo cual, se busca analizar cada una de las técnicas respecto a la respuesta a largo plazo de la estabilidad de dichos efluentes, su solubilidad frente a agentes ambientales, aspectos económicos y su factibilidad técnica de aplicación a escala industrial desde una mirada técnica, económica, legal y sustentable en el tiempo.

### **2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos de este proyecto:

1. Describir el estado del arte del tratamiento de efluentes arsenicales.
2. Mostrar las alternativas de tratamiento de efluentes existentes, que puedan ser implementadas en Altonorte en base a su desempeño técnico/económico y a la normativa ambiental vigente.
3. Evaluar técnica, económicamente la aplicación a escala industrial que cumpla con la normativa ambiental vigente.
4. Recomendar una alternativa, como caso particular, para la Fundición Altonorte en la disposición de sus efluentes. Alternativas de mejora en su proceso desde el punto de vista de Factibilidad Constructiva, CAPEX y OPEX.

## **TIPO DE ESTUDIO**

Para lograr tanto los objetivos específicos como el objetivo general, se van a investigar los Procesos de Fundición de Cu a nivel nacional como internacional, con el fin de conocer el negocio, tipos de concentrados alimentados y sus desarrollos para enfrentar el As en sus procesos.

Cómo lo haremos: recopilando información bibliográfica en la Universidad Católica del Norte; entrevista tanto a personas que trabajan en el ámbito de las fundiciones en las áreas de proceso (conversación con Jefe de Unidad de operaciones Altonorte, medioambiente, desarrollo e investigadores. Además de recopilar antecedentes desde la biblioteca del congreso vía electrónica con respecto a la regulación existente tanto en los ámbitos de la salud, seguridad, medioambiente y comunidad; visitas a: plantas tanto a Altonorte y/u otras operaciones, y lugares de disposición final de efluentes.

Con esta información recopilada se generará una imagen del contexto general del negocio de las fundiciones, de sus procesos de depuración de gases, abatimiento y disposición de As. Luego se procederá a realizar un análisis profundo de las distintas alternativas presentes en el mercado y que actualmente están en operación para el abatimiento y disposición de As, que conllevará a un cuadro de ventajas y desventajas que evaluará varios tópicos, para la toma de decisiones, entre los cuales se consideran:

- Legislación ambiental.
- Disponibilidad y Costo de Reactivos.
- Factibilidad de comercializar y/o reutilizar sub productos.
- Disponibilidad y Costo de Depósitos de Residuos Peligrosos.
- Construcción y mantención de la planta

Realizado este análisis se escogerá la(s) mejor (es) opción (es) para ser aplicada(s) a la Fundición Altonorte, procediendo a realizar un análisis de aspectos constructivos, operatividad y determinación de costos de inversión (CAPEX) y de

operación (OPEX) para proponer una alternativa viable que resuelva el problema de tratamiento y disposición de As en forma sustentable en el tiempo.

Considerando lo expuesto, el alcance del presente trabajo se enmarca desde la salida del efluente de la planta de ácido hasta la disposición final de dicho efluente y sus contenidos, que conlleva a investigar los procesos de abatimiento de arsénico, estabilidad química de los compuestos de Arsénico, características de los efluentes de las planta de ácido y las maneras de confinamiento o disposición final de los compuestos arsenicales implementados en el mercado.

Finalmente, en base a lo expuesto en los párrafos anteriores, el tipo de estudio de este trabajo es descriptivo, con un enfoque tanto cualitativo como cuantitativo. Las fuentes de información serán mixtas.

## **CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se realiza la evaluación técnica-económica de las alternativas presentada en capítulo anterior para ser implementada a nivel industrial.

### **3.1. EVALUAR TÉCNICA Y ECONÓMICAMENTE LA APLICACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL QUE CUMPLA CON LA NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE.**

En este capítulo se analizan las alternativas de proceso que potencialmente se pueden aplicar para el tratamiento de Efluentes de Plantas de Acido (EPAS) en particular al complejo Altonorte. Estos efluentes se caracterizan por su alta concentración de acidez y arsénico. Estos efluentes EPAS, también tienen concentraciones variables de cobre, otros metales base e impurezas tales como cloruro, bismuto, antimonio y plomo, además de sólidos en suspensión.

Dentro de los objetivos de este tratamiento de EPAS es la obtención de un residuo arsenical apto para la disposición final en botadero autorizado y aprovechar de reutilizar el agua recuperada en los procesos de fundición.

Las alternativas técnicas de EPAS se definieron en base a prácticas operacionales de plantas metalúrgicas de Chile y el extranjero, también se fundamenta en desarrollos que han aparecido en el mercado en los años recientes y que se encuentran en evaluación por potenciales usuarios.

La comparación de alternativas se desarrolla en base a la preparación de los siguientes antecedentes:

- Descripción de proceso e instalaciones
- Lista de equipos principales.

En la actualidad los efluentes de las Plantas de Acido de Altonorte se generan con un caudal promedio de 354 m<sup>3</sup>/día. La siguiente tabla muestra la información de caudal y composición química del efluente EPAS que requiere procesar, en el caso que esta solución ácida no se utilizara como solución lixivante en el tratamiento de polvos de fundición de Altonorte.

Tabla 3.1.1: Características de Efluente EPAS a tratamiento

		Escenario	Escenario	Condición
Variable	Unidad	Base	Ampliación	Diseño
Caudal Medio	m <sup>3</sup> /día	354	455	455
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	1090	1090	1090
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l	132,9	131,1	132,9
As	g/l	11,02	16,82	16,82
Cl	g/l	5,0	5,0	5,0
Fe	mg/l	170,0	170,0	170,0
Bi	mg/l	80,0	80,0	80,0
Sb	mg/l	10,0	20,0	20,0
Pb	mg/l	2,0	2,0	2,0

Fuente: Informe Técnico – Definición de Alternativas de Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte (2013).

EPAS se hace para la condición de mayor caudal y máxima carga de acidez, de impurezas y considera la posibilidad de usar módulos paralelos para algunas operaciones unitarias, de tal manera que se pueda cubrir un amplio rango de condiciones de generación de efluentes en las plantas de ácido.

## **3.2. ALTERNATIVAS SELECCIONADAS PARA ANÁLISIS COMPARATIVO**

### **3.2.1. PROCESO ATP/ARSENITO DE CALCIO.**

Proceso de neutralización con cal y posterior precipitación de arsénico a temperatura ambiente en dos etapas, que es seguido por una etapa de filtración, posteriormente por una etapa de secado y calcinación en atmósfera oxidante para aumentar cristalinidad del precipitado. El residuo calcinado es posteriormente enviado a un botadero autorizado para tratamiento final si se requiere y confinamiento por parte de una empresa contratista especializada.

#### **3.2.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES**

Este es un proceso que combina una etapa de oxidación del arsénico trivalente presente en el efluente con la precipitación en ambiente férrico de arsenato amorfo que es convertido a escorodita en una operación de alta presión.

##### **3.2.1.1.1. ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS.**

Esta es la primera etapa del proceso y es esencial para mezclar efluentes y realizar una amortiguación de las fluctuaciones de la concentración de ácido sulfúrico en los efluentes EPAS que provienen además de 2 plantas de ácido.

##### **3.2.1.1.2. OXIDACIÓN Y ADICIÓN DE SOLUCIÓN FÉRRICA**

La segunda etapa del proceso corresponde a la oxidación del arsénico del efluente, una solución del peróxido de hidrógeno y la adición de solución férrica, sin neutralización de la acidez. Las principales variables que influyen en el desempeño de esta etapa son el tiempo de residencia y la agitación a que está sometida la suspensión dentro del reactor.

### **3.2.1.1.3. PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO**

Esta etapa del proceso corresponde a la precipitación con ion férrico del arsénico en el efluente, operando a temperatura ambiente y un pH en el rango de 1,0 a 1,5. El objetivo es obtener niveles bajo 0,5 mg/l de As en la solución de avance. Las principales variables que influyen en el desempeño de esta etapa son el tiempo de residencia, la agitación a que esté sometida la suspensión dentro del reactor, la razón Fe/As utilizada y el pH de la operación.

### **3.2.1.1.4. ESPESAMIENTO DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO.**

Esta operación se realiza en un espesador de 7m de diámetro. Este espesador, cuyo estanque es de acero carbono revestido con neopreno de 6mm, cuenta con rastras construidas de acero inoxidable 316.

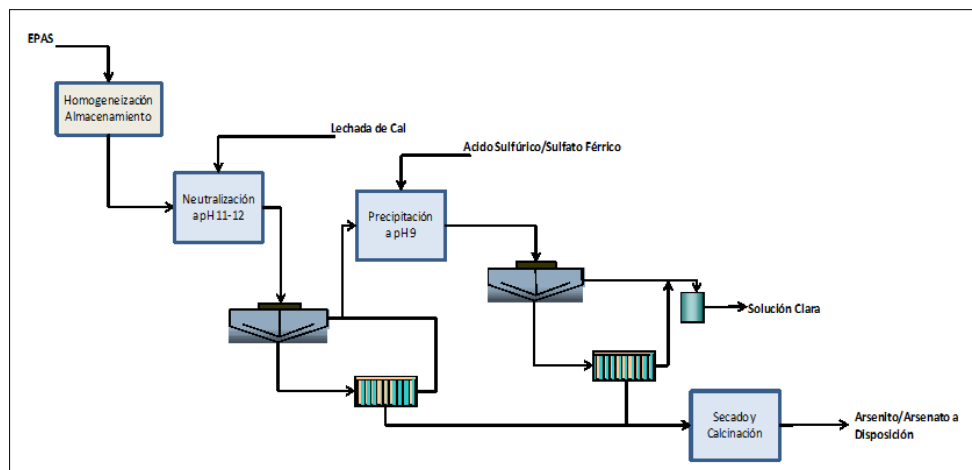
### **3.2.2. PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA ARSENITO/ARSENATO.**

Proceso de neutralización con cal y posterior precipitación de arsénico a temperatura ambiente en dos etapas, que es seguido por una etapa de filtración y posteriormente por una etapa de secado y calcinación en atmósfera oxidante para aumentar cristalinidad del precipitado. El residuo calcinado es posteriormente enviado a un botadero autorizado para tratamiento final si se requiere y confinamiento por parte de una empresa contratista especializada.

Un ejemplo de esta aplicación es la División El Teniente de Codelco quien aplica este proceso en su EPAS. Esta planta dispone de piscinas de recepción de efluentes, trenes de precipitación compuestos por una etapa de neutralización con lechada de cal hasta pH 11 -12 y otra de precipitación férrica a pH 9 con solución de sulfato férrico, espesadores para recepción y espesamiento de la pulpa, estanques agitadores para preparación y almacenamiento de lechada de cal, solución férrica y floculante, estanques agitadores para recepción y almacenamiento de pulpa desde espesador, filtros de prensa y hornos secadores calcinadores.

En la primera etapa de precipitación la solución acidulada de arsénico es neutralizada con lechada de cal hasta pH 11, con una razón de Ca/As que debe estar en el orden de 4.

Figura 3.2.1: Modelo de procesos El Teniente



Fuente: Elaboración propia, 2013.

En la segunda etapa de la planta de tratamiento de efluentes es espesado en un espesador de alta capacidad y filtrado en filtros de prensa, desde donde se obtiene un queque que contiene todo el arsénico principalmente en forma de arsenito de calcio, con cantidades variables de arsenato de calcio y ferrihidrita arsenical. El agua recuperada, con contenido de arsénico casi nulo, es recirculada para su uso en los sistemas de enfriamiento de gases.

La experiencia de División El Teniente muestra que los precipitados obtenidos en este proceso con razones Ca/As superiores a 4 y etapa de calcinación a 700 °C cumplen, prácticamente en el 100% de los casos, los límites de disolución de impurezas del test TCLP, Toxicity Characteristics Leaching Procedure de la EPA de Estados Unidos y usado en Chile en el Reglamento Sanitario sobre Residuos Peligrosos, por lo que sólo requeriría una etapa de disposición final, sin necesidad de una etapa de encapsulamiento que encarece el tratamiento.

Sin embargo, un análisis económico puede establecer la conveniencia de obtener precipitados de menor estabilidad, con razones Ca/As inferiores a 4 y por tanto menor masa de precipitado, que requieren una etapa de encapsulamiento previa a la disposición

final. Este análisis está definido por los costos relativos de la cal y el costo unitario del encapsulamiento.

### **3.2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES**

Para la aplicación de este proceso de neutralización del efluente con lechada de la y posterior precipitación de arsénico a temperatura ambiente en dos etapas se requiere una planta de operación continua compuesta por estanques con agitadores, espesadores/clarificadores, filtros y un horno secador/calcinador. Esta planta debe contar con una planta anexa para almacenamiento y manejo de cal, preparación y distribución de lechada de cal.

A continuación se describen las etapas del proceso y sus instalaciones asociadas.

#### **3.2.2.1.1. ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS.**

Esta es la primera etapa del proceso y es esencial para mezclar efluentes y realizar una amortiguación de las fluctuaciones de la concentración de ácido sulfúrico en los efluentes EPAS que provienen además de 2 plantas de ácido en el caso de Teniente.

Esta operación se hace en dos estanques de FRP de 28 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie. El tiempo de residencia en cada estanque es de 1 horas.

La solución homogenizada se impulsa a la siguiente etapa con una bomba centrífuga horizontal.

### 3.2.2.1.2. NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN DE METALES

La segunda etapa del proceso corresponde a la neutralización de la acidez, subiendo el pH a valores entre 11 - 12 con lechada de cal, precipitando los hidróxidos metálicos, sulfato de calcio y arsénico hasta niveles bajo 100 mg/l de As. Las principales variables que influyen en el desempeño de esta etapa son el tiempo de residencia, la agitación a que está sometida la suspensión dentro del reactor, la razón Ca/As utilizada y el pH de operación.

Se ha determinado que para lograr una precipitación adecuada de arsénico, resulta suficiente con una razón Ca/As cercana a 1, con un pH superior a 11. Sin embargo, la razón estequiométrica Ca/As es 0,5 en el caso de formación de arsenito de calcio. Por otra parte la razón estequiométrica Ca/As es 1,5 en el caso de formación de arsenato de calcio. Como el arsénico está prácticamente en su totalidad con valencia +3, se sabe que esta etapa se producen básicamente arsenitos.

Para lograr un ajuste de la razón Ca/As a un valor deseable de 4 para lograr asegurar la estabilidad del residuo arsenical debe agregarse más lechada de cal en la etapa posterior de filtración. En caso contrario se obtendrá agua clara con un pH elevado.

Esta operación se realiza en dos estanques de FRP de 47 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie. El tiempo de residencia en cada estanque es de 1,5 horas.

A la pulpa del segundo reactor de neutralización y precipitación se le agrega una solución de floculante (15 mg floculante/litro efluente). Esta pulpa finalmente se impulsa hasta la etapa de espesamiento con una bomba horizontal, con aplicación de pulpa.

### **3.2.2.1.3. ESPESAMIENTO DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN DE METALES**

Esta operación se realiza en un espesador de 6 m de diámetro. Este espesador, cuyo estanque es de acero carbono revestido con neopreno de 6 mm, cuenta con rastras construidas de acero inoxidable 316.

La pulpa espesada entre 15% y 20% sólidos en peso, se descarga hacia la etapa de filtración con bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa. La solución clara, con sólidos en suspensión hasta 100 mg/l, se conduce gravitacionalmente hacia la etapa de precipitación férrica.

### **3.2.2.1.4. FILTRACIÓN DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN DE METALES**

La filtración de la pulpa de neutralización se realiza con un filtro de prensa de 108 m<sup>2</sup> de área de filtración (tasa de filtración 275 Kg/m<sup>2</sup>). La pulpa de alimentación a filtración se descarga en un estanque de FRP de 20 m<sup>3</sup> de capacidad útil. Desde allí se impulsa la pulpa de alimentación al filtro de prensa, a través de una bomba de diafragma.

El líquido filtrado, con sólidos en suspensión hasta 100 mg/l, se conduce gravitacionalmente a un estanque de FRP de 20 m<sup>3</sup> de capacidad útil para almacenamiento de líquido claro. Desde allí se impulsa con una bomba centrífuga horizontal hacia la etapa de precipitación férrica. El residuo de la neutralización, con una humedad del 56%, se descarga del filtro hacia un chute y luego por medio de tres correas transportadoras, de 18" de ancho, hasta el horno secador.

### 3.2.2.1.5. SECADO Y CALCINACIÓN DEL RESIDUO ARSENICAL

La operación de secado se realiza en un horno secador rotatorio de 9 m de longitud. La temperatura de secado es de 200 °C y el tiempo de residencia es de 1 hora. La humedad a final del secado es inferior a 10% en peso. La alimentación del secador es por un alimentador de tornillo. La descarga del secador es hacia el horno calcinador.

La calcinación se realiza en un horno rotatorio de 16 m de longitud. la temperatura de calcinación es de 700 °C y el tiempo de residencia es de 1 hora. La descarga del calcinador es hacia un equipo ensacador de capacidad 5 t/h, el que funciona con diesel.

Finalmente la Planta tiene una tasa de tratamiento de 455 m<sup>3</sup>/día con un tiempo de operación de 20 hr/día.

Los consumos de reactivos e insumos relevantes de la planta son los siguientes:

- Agua de preparación lechada de cal: 172,8 m<sup>3</sup>/día
- Agua de preparación floculante: 3,7 m<sup>3</sup>/día
- Floculante: 18,6 Kg/día
- Cal (80% CaO libre): 43,2 t/día
- Solución Férrica (7% Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>): 53,3 t/día
- Ácido sulfúrico (98%): 1,14 t/día
- Diesel: 9 t/día

En la tabla 3.2.1 se aprecian los equipos de la planta

Tabla 3.2.1: Listado de Equipos

N°	Nombre	Cantidad	Descripción
<b>Alimentación Planta</b>			
1	Piscina de Emergencia	1	9100 m3 útiles
2	Estanque de Almacenamiento	2	227,5 m3 útiles
3	Bombas de Alimentación	2	22,8 m3/h
<b>Neutralización y Precipitación Metales</b>			
1	Reactores de Neutralización	2	47,1 m3 útiles
2	Agitadores reactores neutralización	2	8,5 KW
3	Bombas de piso	2	22,8 m3/h
<b>Espesamiento de Pulpa de Neutralización</b>			
1	Espesador	1	6 m diámetro
2	Bombas U/F	2	14 m3/h
<b>Filtración de Pulpa Neutralización</b>			
1	Estanque de Alimentación Filtro	1	20 m3 útiles
2	Filtro de Prensa	1	108 m2
3	Estanque de Filtrado	1	20 m3 útiles
4	Bombas de Alimentación Filtro	2	14 m3/h
<b>Precipitación Férrica de Arsénico</b>			
1	Reactores de Precipitación	2	30,6 m3 útiles
2	Agitadores de Reactores Precipitación	2	5,5 KW
3	Bombas de Piso	2	22,8 m3/h
<b>Espesamiento de Pulpa de Precipitación</b>			
1	Espesador	1	9 m de diámetro
2	Bombas U/F	2	0,4 m3/h
<b>Filtración de Pulpa Precipitación</b>			
1	Estanque de alimentación filtro	1	2 m3 útiles
2	Filtro de prensa	1	24 m3
3	Estanque filtrado	1	2 m3 útiles
4	Bombas alimentación filtro	2	0,4 m3/h
<b>Secado y Calcinado de Residuo</b>			
1	Horno Secador	1	2,5m x 9m longitud
2	Horno Calcinador	1	3,0m x 16m longitud
3	Unidad de ensacado Residuo	1	4,7 t/h
<b>Almacenamiento Agua Clara</b>			
1	Estanque de Almacenamiento	1	120 m3 útiles
2	Bombas de Traspaso	2	30,1 m3/h
<b>Manejo y Preparación Lechada de Cal</b>			
1	Unidad Preparación Lechada de cal	1	43 t/día

2	Bombas de Traspaso	2	9,3 m3/h
---	--------------------	---	----------

Fuente: Elaboración propia, 2014.

### 3.2.3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FERRIHIDRITA

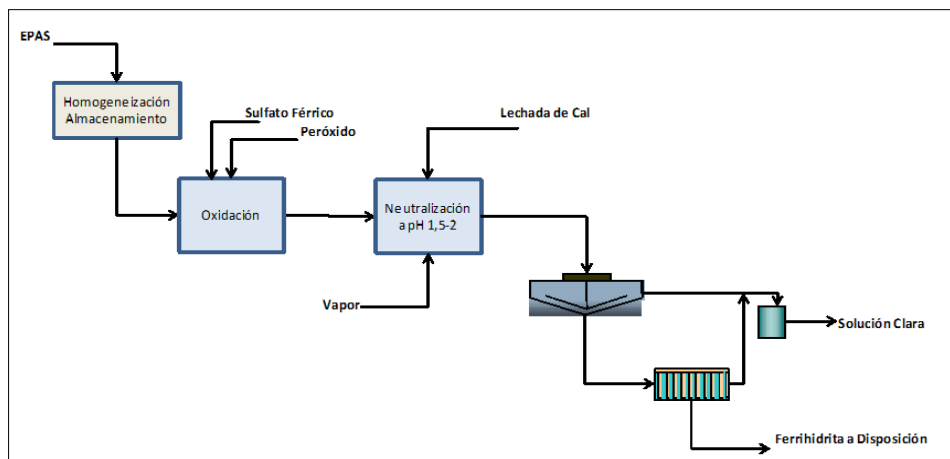
En este proceso se combina una etapa de oxidación del arsénico trivalente presente en el efluente con la precipitación en ambiente férrico una de las formas de arsenato férrico con alta estabilidad en el largo plazo, la ferrihidrita arsenical ( $\text{FeO} \cdot \text{OH} \cdot (\text{H}_2\text{O})_6 \cdot \text{AsO}_4$ ).

Este desarrollo se ha centrado en la optimización de la precipitación de arsénico pentavalente y ión férrico, ya que se reconoce que las especies con arsénico pentavalente son menos tóxicas que las especies con arsénico trivalente.

La producción de este compuesto de arsénico fue catalogado por la EPA de Estados Unidos en los primeros años de este siglo como la mejor tecnología demostrada disponible (sigla en inglés BACT). Los informes de operaciones que producen este precipitado indican que los límites de solubilidad del test TCLP se cumplen en prácticamente todos los casos, si se aplica una razón molar de  $\text{Fe}^{+3}/\text{As}^{+5} > 4$ .

La siguiente figura muestra un diagrama de un proceso típico para la producción de ferrihidrita por precipitación.

Figura 3.2.2: Proceso de producción Ferrihídrita



Fuente: Elaboración propia, 2014.

### 3.2.3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES

Este es un proceso que combina una etapa de oxidación del arsénico trivalente presente en el efluente con la precipitación en ambiente férrico de ferrihídrita arsenical.

Para la aplicación de este proceso se requiere una planta de operación continua compuesta con una planta anexa para almacenamiento y manejo de cal, preparación, distribución de lechada de cal. Además se requiere una unidad térmica para generación de vapor saturado, para el calentamiento de pulpa en la precipitación férrica.

A continuación se describen las etapas del proceso y sus instalaciones asociadas.

#### 3.2.3.1.1. ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS.

Esta es la primera etapa del proceso y es esencial para mezclar efluentes y realizar una amortiguación de las fluctuaciones de la concentración de ácido sulfúrico en los efluentes EPAS que provienen además de 2 plantas de ácido en el caso de Altonorte.

Esta operación se hace en dos estanques de FRP de 28 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie.

El tiempo de residencia en cada estanque es de 1 horas.

La solución homogenizada se impulsa a la siguiente etapa con una bomba centrífuga horizontal.

#### **3.2.3.1.2. OXIDACIÓN Y ADICIÓN DE SOLUCIÓN FÉRRICA**

La segunda etapa del proceso corresponde a la oxidación del arsénico del efluente, una solución del peróxido de hidrógeno y la adición de solución férrica, sin neutralización de la acidez. Las principales variables que influyen en el desempeño de esta etapa son el tiempo de residencia y la agitación a que está sometida la suspensión dentro del reactor.

Esta operación se realiza en dos estanques de FRP de 20 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie. El tiempo de residencia es de 0,5 horas.

La solución de peróxido de hidrógeno se agrega al primer estanque, mientras que la solución férrica se agrega al segundo estanque. La solución mezclada del segundo estanque se impulsa hasta la etapa de precipitación férrica con una bomba centrífuga horizontal.

#### **3.2.3.1.3. PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO**

Esta etapa del proceso corresponde a la precipitación con ión férrico del arsénico en el efluente, operando a 85°C y un pH en el rango de 1,5 a 1,8. El objetivo es obtener

niveles bajo 0,5 mg/l de As en la solución de avance. Las principales variables que influyen en el desempeño de esta etapa son el tiempo de residencia, la agitación a que esté sometida la suspensión dentro del reactor, la razón Fe/As utilizada, la temperatura y el pH de la operación.

Se ha determinado que para lograr una precipitación adecuada de arsénico, resulta necesaria una razón molar Fe/As superior a 1,5 con un pH no superior a 1,8 ni inferior a 1,5. El ajuste de pH desde pH más ácido que tiene el efluente de alimentación se hace adicionando lechada de cal.

Esta operación se realiza en dos estanques de 47 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Cada estanque cuenta con agitador mecánico. El tiempo de residencia en cada estanque de precipitación férrica es de 10 horas. El calentamiento de la solución se hace con vapor saturado de 200°C que circula por serpentín al interior de los estanques.

A la pulpa del segundo reactor de precipitación se le agrega una solución de floculante (150 g/t precipitado). Esta pulpa finalmente se impulsa hasta la etapa de espesamiento con una bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa.

#### **3.2.3.1.4. ESPESAMIENTO DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO.**

Esta operación se realiza en un espesador de 7 m de diámetro. Este espesador, cuyo estanque es de acero carbono revestido con neopreno de 6mm, cuenta con rastras construidas de acero inoxidable 316.

La pulpa espesada entre 35% y 45% sólidos en peso, se descarga a la etapa de filtración con bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa. La solución clara, con sólidos en suspensión hasta 50 mg/l, se conduce gravitacionalmente hacia la etapa de neutralización final.

### **3.2.3.1.5. FILTRACIÓN DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO.**

La filtración de la pulpa de neutralización se realiza con un filtro de prensa de 125 m<sup>2</sup> de área de filtración (tasa de filtración 50 Kg/m<sup>2</sup>). La pulpa de alimentación a filtración se descarga en un estanque de FRP de 11 m<sup>3</sup> de capacidad útil. Desde allí se impulsa la pulpa de alimentación al filtro de prensa, a través de una bomba de diafragma.

El líquido filtrado, con sólidos en suspensión hasta 100 mg/l, se conduce gravitacionalmente a un estanque de FRP de 11 m<sup>3</sup> de capacidad útil para almacenamiento de líquido claro. Desde allí se impulsa con una bomba centrífuga horizontal. El residuo de la precipitación, con un porcentaje de sólidos del 80%, se descarga del filtro hacia un chute y luego por medio de tres correas transportadoras, de 18" de ancho, luego se transporta hacia un equipo ensacador de 7 t/h de capacidad.

### **3.2.3.1.6. NEUTRALIZACIÓN FINAL DE LÍQUIDO CLARO.**

Los líquidos claros obtenidos en las tapas de espesamiento y filtración se descargan a un conjunto de estanques de neutralización de la acidez, subiendo el pH a valores de 6,5 a 7 con lechada de cal, precipitando sulfato de calcio.

Esta operación se realiza en dos estanques de FRP de 93 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie. El tiempo de residencia en cada estanque es de 1,5 horas.

A la pulpa del segundo reactor de neutralización se le agrega una solución floculante (15 mg floculante/l efluente). Esta pulpa finalmente se impulsa hasta la etapa de espesamiento de precipitado de neutralización con una bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa.

### 3.2.3.1.7. ESPESAMIENTO DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN

Esta operación se realiza en un espesador de 2 m de diámetro. Este espesador, cuyo estanque es de acero carbono revestido con neopreno de 6 mm, cuenta con rastras construidas de acero inoxidable 316. La velocidad media de sedimentación de esta pulpa es del orden de 1,5 cm/min.

La pulpa espesada entre 35% y 40% sólidos en peso, se descarga a la etapa de filtración con bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa. La solución clara, con sólidos en suspensión hasta 100 mg/l, se conduce gravitacionalmente hacia un estanque de almacenamiento de agua clara.

- Caudal de diseño 455 m<sup>3</sup>/día
- Tiempo efectivo de utilización planta 20 h/día.

Los consumos de reactivos e insumos relevantes del proceso:

- Agua de lavado en filtro: 311,3 m<sup>3</sup>/día
- Agua de precipitación Lechada de cal: 159,3 m<sup>3</sup>/día
- Agua de Preparación Floculante: 3,1 m<sup>3</sup>/día
- Floculante: 15,6 Kg/día
- Cal (80% CaO libre): 43,2 t/día
- Solución Férrica (7% Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>): 335,5 t/día
- Vapor saturado (200°C): 188,4 t/día

Tabla 3.2.2: Listado de Equipos.

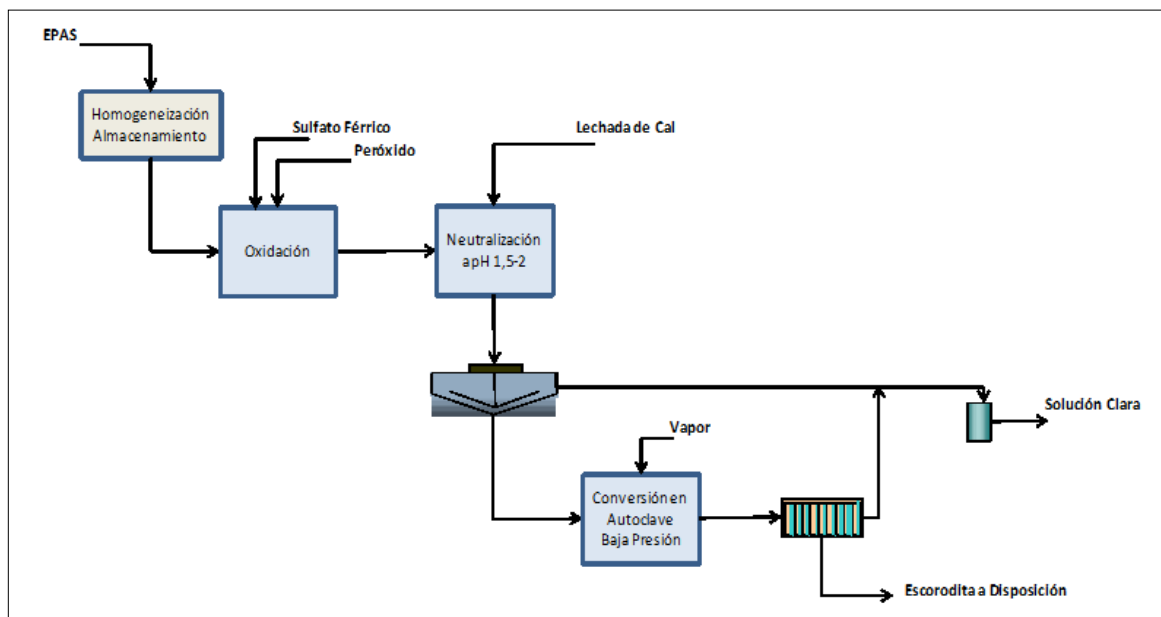
N°	Nombre	Cantidad	Descripción
<b>Alimentación Planta</b>			
1	Piscina de Emergencia	1	9100 m3 útiles
2	Estanque de Almacenamiento	2	227,5 m3 útiles
3	Bombas de Alimentación	2	22,8 m3/h
<b>Oxidación y Adición de Solución Férrica</b>			
1	Reactores de Mezcla	2	19,6 m3 útiles
2	Agitadores reactores mezcla	2	3,5 KW
3	Bombas de piso	2	22,8 m3/h
<b>Neutralización y Precipitación de Arsénico</b>			
1	Reactores de Precipitación	2	47 m3 útiles
2	Agitadores reactores de precipitación	2	85 KW
3	Bombas de piso	2	22,8 m3/h
<b>Espesamiento de Pulpa Precipitación</b>			
1	Espesador	1	7 m de diámetro
2	Bombas U/F	2	8,1 m3/h
<b>Filtración de Pulpa Precipitación</b>			
1	Estanque de Alimentación Filtro	1	11 m3 útiles
2	Filtro de Prensa	1	125 m2
3	Estanque de Filtrado	1	11 m3 útiles
4	Bombas de Alimentación Filtro	2	8,1 m3/h
<b>Neutralización Final</b>			
1	Reactores de Neutralización	2	92,6 m3 útiles
2	Agitadores de Reactores Neutralización	2	16,7 KW
3	Bombas de Piso	2	22,8 m3/h
<b>Espesamiento de Pulpa de Precipitación</b>			
1	Espesador	1	2 m de diámetro
2	Bombas U/F	2	0,8 m3/h
<b>Manejo y Ensacado de Residuo</b>			
1	Unidad de Ensacado de Residuo	1	6,9 t/h
<b>Almacenamiento Agua Clara</b>			
1	Estanque de Almacenamiento	1	243 m3 útiles
2	Bombas de Traspaso	2	60,7 m3/h
<b>Manejo y Preparación Lechada de Cal</b>			
1	Unidad Preparación Lechada de cal	1	43 t/día
2	Bombas de Traspaso	2	9,3 m3/h
<b>Sistema de Vapor Saturado</b>			
1	Unidad Generación Vapor Saturado	1	9,4 t/h

Fuente: Elaboración propia, 2014.

### 3.2.4. PRODUCCIÓN DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO CON CONVERSIÓN TÉRMICA (ESCORODITA).

La siguiente figura muestra una aplicación típica del proceso de producción de arsenato férrico con posterior conversión térmica en escorodita.

Figura 3.2.3: Proceso de producción Escorodita



Fuente: Elaboración propia, 2013.

Las primeras etapas de este proceso corresponden a la adición de solución férrica y la oxidación del arsénico trivalente. La oxidación del efluente puede realizarse con peróxido de hidrógeno a temperatura ambiente en un estanque con agitador.

La precipitación de arsenato férrico amorfo a temperatura ambiente, se realiza mediante la neutralización parcial del efluente ya oxidado con lechada de cal. Esta neutralización se realiza en una serie de estanques con agitadores, conectados en cascada y operando cada uno a pH específico y controlado. Para promover el crecimiento de las partículas de precipitado, recircula a los reactores iniciales de la serie de fracción de la descarga (underflow) del espesador que recibe la descarga de pulpa del último reactor.

La conversión térmica a fase cristalina del precipitado arsenical se realiza en autoclaves horizontales continuos de baja presión. La pulpa de arsenato férrico amorfo se acidifica con ácido sulfúrico concentrado hasta pH en el rango de 1 a 1,5 antes de alimentarse a los autoclaves. La descarga de los autoclaves e impulsa a filtro a filtro de prensa, desde donde se descarga arsenato férrico cristalino que se transporta a su sitio de disposición final.

### **3.2.4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO E INSTALACIONES**

Este es un proceso que combina una etapa de oxidación del arsénico trivalente presente en el efluente con la precipitación en ambiente férrico de arsenato amorfo que es convertido a escorodita en una operación de alta presión.

Para la aplicación de este proceso se requiere una planta de operación continua compuesta por estanques con agitadores, espesadores /clarificadores, filtros y un autoclave. Esta planta con una planta anexa para almacenamiento y manejo de cal, preparación y distribución de lechada de cal. Además, se requiere una unidad térmica para generación de vapor saturado, para el calentamiento en la conversión térmica.

#### **3.2.4.1.1. ALMACENAMIENTO Y HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE EPAS.**

Esta es la primera etapa del proceso y es esencial para mezclar efluentes y realizar una amortiguación de las fluctuaciones de la concentración de ácido sulfúrico en los efluentes EPAS que provienen además de 2 plantas de ácido.

Esta operación se hace en dos estanques de FRP de 228 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie. El tiempo de residencia en cada estanque es de 10 horas.

La solución homogenizada se impulsa a la siguiente etapa con una bomba centrífuga horizontal.

#### **3.2.4.1.2. OXIDACIÓN Y ADICIÓN DE SOLUCIÓN FÉRRICA**

La segunda etapa del proceso corresponde a la oxidación del arsénico del efluente, una solución del peróxido de hidrógeno y la adición de solución férrica, sin neutralización de la acidez. Las principales variables que influyen en el desempeño de esta etapa son el tiempo de residencia y la agitación a que está sometida la suspensión dentro del reactor.

Esta operación se realiza en dos estanques de FRP de 20 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie. El tiempo de residencia es de 0,5 horas.

La solución de peróxido de hidrógeno se agrega al primer estanque, mientras que la solución férrica se agrega al segundo estanque. La solución mezclada del segundo estanque se impulsa hasta la etapa de precipitación férrica con una bomba centrífuga horizontal.

#### **3.2.4.1.3. PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSENATO FÉRRICO AMORFO**

Esta etapa del proceso corresponde a la precipitación con ión férrico del arsénico en el efluente, operando a temperatura ambiente y un pH en el rango de 1,0 a 1,5. El objetivo es obtener niveles bajo 0,5 mg/l de As en la solución de avance. Las principales variables que influyen en el desempeño de esta etapa son el tiempo de residencia, la agitación a que esté sometida la suspensión dentro del reactor, la razón Fe/As utilizada y el pH de la operación.

Se ha determinado que para lograr una precipitación adecuada de arsénico, resulta necesaria una razón molar Fe/As superior a 1,6 con un pH no superior a 3,0 ni inferior a 2,5. El ajuste de pH desde pH más ácido que tiene el efluente de alimentación se hace adicionando lechada de cal.

Esta operación se realiza en dos estanques de 47 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Cada estanque cuenta con agitador mecánico. El tiempo de residencia en cada estanque de precipitación férrica es de 1 hora.

A la pulpa del segundo reactor de precipitación se le agrega una solución de floculante (150 g/t precipitado). Esta pulpa finalmente se impulsa hasta la etapa de espesamiento con una bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa.

#### **3.2.4.1.4. ESPESAMIENTO DE PULPA DE PRECIPITACIÓN FÉRRICA DE ARSÉNICO.**

Esta operación se realiza en un espesador de 7m de diámetro. Este espesador, cuyo estanque es de acero carbono revestido con neopreno de 6mm, cuenta con rastras construidas de acero inoxidable 316.

La pulpa espesada entre 35% y 45% sólidos en peso, se descarga a la etapa de filtración con bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa. La solución clara, con sólidos en suspensión hasta 50 mg/l, se conduce gravitacionalmente hacia la etapa de neutralización final.

#### **3.2.4.1.5. CONVERSIÓN TÉRMICA DE PRECIPITADO FÉRRICO**

La pulpa del espesamiento de la precipitación férrica se descarga en un estanque de acondicionamiento, donde se ajusta el pH con ácido sulfúrico hasta un rango de pH 1,0 a 1,5. Este estanque, que tiene un tiempo de residencia de 0,5 horas, es un estanque de FRP de 5 m<sup>3</sup> de capacidad útil. Desde allí se impulsa la pulpa de alimentación al autoclave, a través de una bomba de diafragma de alta presión.

La conversión térmica del precipitado de arsenato férrico se realiza en un autoclave horizontal continuo a temperatura 150°C y con una presión de 2 bar de vapor de agua. Tiempo de residencia en este equipo es de 1 hora.

La pulpa abandona el autoclave hacia un estanque de enfriamiento flash. Este estanque de diseño especial y revestimiento refractario cuenta con un agitador mecánico. La pulpa se impulsa con una bomba de diafragma hacia la etapa de filtración.

#### **3.2.4.1.6. CONVERSIÓN TÉRMICA DE PRECIPITADO FÉRRICO**

La filtración de la pulpa de conversión térmica se realiza con un filtro de prensa de 125 m<sup>2</sup> de área de filtración (tasa de filtración 50 Kg/m<sup>2</sup>). La pulpa de alimentación a filtración se descarga en un estanque de FRP de 12 m<sup>3</sup> de capacidad útil. Desde allí se impulsa la pulpa de alimentación al filtro de prensa, a través de una bomba de diafragma.

El líquido filtrado, con sólidos en suspensión hasta 100 mg/l, se conduce gravitacionalmente a un estanque de FRP de 12 m<sup>3</sup> de capacidad útil para almacenamiento de líquido claro. Desde allí se impulsa con una bomba centrífuga horizontal. El residuo de la precipitación, con un porcentaje de sólidos del 80%, se descarga del filtro hacia un chute y luego por medio de dos correas transportadoras, de 18" de ancho, luego se transporta hacia un equipo ensacador de 7 t/h de capacidad.

#### **3.2.4.1.7. NEUTRALIZACIÓN FINAL DE LÍQUIDO CLARO.**

Los líquidos claros obtenidos en las tapas de espesamiento y filtración se descargan a un conjunto de estanques de neutralización de la acidez, subiendo el pH a valores de 6,5 a 7 con lechada de cal, precipitando sulfato de calcio.

Esta operación se realiza en dos estanques de FRP de 93 m<sup>3</sup> de capacidad útil cada uno. Estos estanques cuentan con agitadores mecánicos y se conectan hidráulicamente en serie. El tiempo de residencia en cada estanque es de 1,5 horas.

A la pulpa del segundo reactor de neutralización se le agrega una solución floculante (15 mg floculante/l efluente). Esta pulpa finalmente se impulsa hasta la etapa de espesamiento de precipitado de neutralización con una bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa.

#### **3.2.4.1.8. ESPESAMIENTO DE PULPA DE NEUTRALIZACIÓN**

Esta operación se realiza en un espesador de 2m de diámetro. Este espesador, cuyo estanque es de acero carbono revestido con neopreno de 6mm, cuenta con rastras construidas de acero inoxidable 316. La velocidad media de sedimentación de esta pulpa es del orden de 1,5 cm/min.

La pulpa espesada entre 35% y 40% sólidos en peso, se descarga a la etapa de filtración con bomba centrífuga horizontal, con aplicación para pulpa. La solución clara, con sólidos en suspensión hasta 100 mg/l, se conduce gravitacionalmente hacia un estanque de almacenamiento de agua clara.

- Caudal de diseño 455 m<sup>3</sup>/día
- Tiempo efectivo de utilización planta 20 h/día.

Los consumos de reactivos e insumos relevantes del proceso:

- Agua de lavado en filtro: 311,3 m<sup>3</sup>/día
- Agua de precipitación Lechada de cal: 159,3 m<sup>3</sup>/día
- Agua de Preparación Floculante: 3,1 m<sup>3</sup>/día
- Floculante: 15,6 Kg/día
- Cal (80% CaO libre): 43,2 t/día
- Solución Férrica (7% Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>): 335,5 t/día
- Peróxido de Hidrógeno (70%): 2,8 t/día
- Ácido Sulfúrico (98%): 1,8 t/día
- Vapor saturado (200°C): 215,8 t/día

Tabla 3.2.3: Listado de Equipos.

N°	Nombre	Cantidad	Descripción
<b>Alimentación Planta</b>			
1	Piscina de Emergencia	1	9100 m3 útiles
2	Estanque de Almacenamiento	2	227,5 m3 útiles
3	Bombas de Alimentación	2	22,8 m3/h
<b>Oxidación y Adición de Solución Férrica</b>			
1	Reactores de Mezcla	2	19,6 m3 útiles
2	Agitadores reactores mezcla	2	3,5 KW
3	Bombas de piso	2	22,8 m3/h
<b>Neutralización y Precipitación de Arsénico</b>			
1	Reactores de Precipitación	2	47 m3 útiles
2	Agitadores reactores de precipitación	2	85 KW
3	Bombas de piso	2	22,8 m3/h
<b>Espesamiento de Pulpa Precipitación</b>			
1	Espesador	1	7 m de diámetro
2	Bombas U/F	2	8,2 m3/h
<b>Conversión Térmica</b>			
1	Estanque de Acondicionamiento	1	5,0 m3 útiles
2	Agitador estanque de Acondicionamiento	1	1 KW
3	Bombas de Alta Presión	2	10 m3/h
4	Autoclave y Sistema Flash	1	10,0 m3 útiles
<b>Filtración de Pulpa Precipitación</b>			
1	Estanque de Alimentación Filtro	1	12 m3 útiles
2	Filtro de Prensa	1	125 m2
3	Estanque de Filtrado	1	12 m3 útiles
4	Bombas de Alimentación Filtro	2	8,2 m3/h
<b>Neutralización Final</b>			
1	Reactores de Neutralización	2	92,7 m3 útiles
2	Agitadores de Reactores Neutralización	2	16,7 KW
3	Bombas de Piso	2	22,8 m3/h

Fuente: Elaboración propia, 2013.

Tabla 3.2.4: Listado de Equipos. Continuación.

N°	Nombre	Cantidad	Descripción
<b>Espesamiento de Pulpa de Precipitación</b>			
1	Espesador	1	2 m de diámetro
2	Bombas U/F	2	0,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Manejo y Ensacado de Residuo</b>			
1	Unidad de Ensacado de Residuo	1	6,9 t/h
<b>Almacenamiento Agua Clara</b>			
1	Estanque de Almacenamiento	1	243 m <sup>3</sup> útiles
2	Bombas de Traspaso	2	60,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Manejo y Preparación Lechada de Cal</b>			
1	Unidad Preparación Lechada de cal	1	43 t/día
2	Bombas de Traspaso	2	9,3 m <sup>3</sup> /h
<b>Sistema de Vapor Saturado</b>			
1	Unidad Generación Vapor Saturado	1	10,8 t/h

Fuente: Elaboración propia, 2014.

### 3.3. COSTOS DE INVERSIÓN, CAPEX.

En esta parte se revisa los costos de inversión de los procesos de neutralización con cal y posterior precipitación de arsénico a temperatura ambiente en dos etapas, que es seguido por una etapa de filtración y posteriormente por una etapa de secado y calcinación en atmósfera oxidante para aumentar cristalinidad del precipitado, luego el residuo calcinado es posteriormente enviado a un botadero autorizado para tratamiento final si se requiere y confinamiento por parte de una empresa contratista especializada. Estos procesos se pueden resumir en las siguientes alternativas:

- Alternativa 1: Proceso ATP/Arsenito de Calcio
- Alternativa 2: Proceso ETP/Arsenito + Arseniato
- Alternativa 3: Proceso Ecometales/Ferrihidrita
- Alternativa 4: Proceso Outotec/Escorodita.

#### 3.3.1. ALTERNATIVA 1: PROCESO ATP/ARSENITO DE CALCIO

En tablas se aprecia el costo de inversión para el proceso ATP/Arsenito de Calcio

Tabla 3.3.1: Estimación de Capex Proceso ATP/Arsenito de Calcio sin Relleno de Seguridad.

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: Proceso ATP PROCESO ARSENITO DE CALCIO</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	<b>KUSD</b>
TRATAMIENTO EFLUENTES (PLANTA ACIDO)	
ALIMENTACION PLANTA	906
NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN	3.606
ESPESAMIENTO FILTRACIÓN	3.088
DISPOSICIÓN DE POLVOS SIN TRATAR	1.834
<b>GENERAL Y SERVICIOS</b>	
OBRAS DE CONSTRUCCIÓN	2.092
ENERGÍA ELÉCTRICA Y CONTROL	1.862
SUMINISTRO AIRE COMPRIMIDO	423
TIE IN CAÑERÍAS Y VÁLVULAS	194
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>14.005</b>

Tabla 3.3.2: Estimación de Capex Proceso ATP/Arsenito de Calcio sin Relleno de Seguridad.

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: Proceso ATP PROCESO ARSENITO DE CALCIO</b>	
<b>COSTO INDIRECTO</b>	<b>KUSD</b>
FLETES Y SEGUROS	840
REPUESTOS	280
ASESORIA DE VENDOR	210
COSTOS DE INGENIERÍA	700
COSTOS DEL DUEÑO	2101
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>4131</b>
CONTINGENCIAS E INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	4534
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>4534</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>22.670</b>

Tabla 3.3.3: Estimación de Capex de Relleno de Seguridad para Proceso ATP/Arsenito de Calcio.

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: RELLENO DE SEGURIDAD PROCESO ATP/ARSENITO DE CALCIO</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	<b>KUSD</b>
RELLENO DE SEGURIDAD	5.395
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>5.395</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
FLETES Y SEGUROS	0
REPUESTOS	0
ASESORIA DE VENDOR	54
COSTOS DE INGENIERÍA	270
COSTOS DEL DUEÑO	809
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>1133</b>
CONTINGENCIAS E INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	1632
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>1632</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>8.160</b>

### 3.3.2. ALTERNATIVA 2: PROCESO ETP/ARSENITO + ARSENIATO

Tabla 3.3.4: Estimación de Capex Proceso ETP/Arsenito + Arseniato de Calcio sin Relleno de Seguridad.

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: ETP ARSENITO + ARSENIATO</b>	<b>KUSD</b>
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
TRATAMIENTO EFLUENTES (PLANTA ACIDO)	
ALIMENTACION PLANTA	906
NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN	2.902
ESPESAMIENTO FILTRACIÓN	2.985
PRECIPITACIÓN ESPESADO Y FILTRACIÓN. FERRICO	3.446
SECADO Y CALCINACIÓN	7.169
DISPOSICIÓN DE POLVOS SIN TRATAR	1.834
<b>GENERAL Y SERVICIOS</b>	
OBRAS DE CONSTRUCCIÓN	3.077
ENERGÍA ELÉCTRICA Y CONTROL	2.060
SUMINISTRO AIRE COMPRIMIDO	424
SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE	64
TIE IN CAÑERÍAS Y VÁLVULAS	158
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>25.025</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
FLETES Y SEGUROS	1501
REPUESTOS	500
ASESORIA DE VENDOR	375
COSTOS DE INGENIERÍA	1251
COSTOS DEL DUEÑO	3754
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>7381</b>
CONTINGENCIAS E INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	8102
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>8102</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>40.508</b>

Tabla 3.3.5: Relleno de seguridad Proceso ETP/Arsenito + Arseniato

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: RELLENO DE SEGURIDAD</b>	<b>KUSD</b>
<b>PROCESO ETP</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
RELLENO DE SEGURIDAD	3.150
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>3.150</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
FLETES Y SEGUROS	0
REPUESTOS	0
ASESORIA DE VENDOR	32
COSTOS DE INGENIERÍA	158
COSTOS DEL DUEÑO	473
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>663</b>
CONTINGENCIAS E INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	953
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>953</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>4.766</b>

### 3.3.3. ALTERNATIVA 3: PROCESO ECOMETALES/FERRIHIDRITA

Tabla 3.3.6: Estimación de Capex Proceso Ecometales/Ferrihidrita.

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: PROCESO ECOMETALES</b>	<b>KUSD</b>
<b>FERRIHIDRITA</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
TRATAMIENTO EFLUENTES (PLANTA ACIDO)	
ALIMENTACION PLANTA	906
OXIDACION	714
NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN	5.984
ESPESAMIENTO FILTRACIÓN	2.285
NEUTRALIZACION FINAL-ESPESADO PULPA	2.041
DISPOSICIÓN DE POLVOS SIN TRATAR	1.834
<b>GENERAL Y SERVICIOS</b>	
OBRAS DE CONSTRUCCIÓN	3.200
ENERGÍA ELÉCTRICA Y CONTROL	2.008
SUMINISTRO AIRE COMPRIMIDO	287
SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE	658
TIE IN CAÑERÍAS Y VÁLVULAS	311
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>20.228</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
FLETES Y SEGUROS	1214
REPUESTOS	405
ASESORIA DE VENDOR	303
COSTOS DE INGENIERÍA	1011
COSTOS DEL DUEÑO	3034
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>5967</b>
CONTINGENCIAS E INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	6549
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>6549</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>32.744</b>

Tabla 3.3.7: Relleno de Seguridad para Proceso Ecometales/Ferrihidrita

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: RELLENO DE SEGURIDAD</b>	<b>KUSD</b>
<b>PROCESO ECOMETALES FERRIHIDRITA</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
RELLENO DE SEGURIDAD	3.361
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>3.361</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
FLETES Y SEGUROS	0
REPUESTOS	0
ASESORIA DE VENDOR	34
COSTOS DE INGENIERÍA	168
COSTOS DEL DUEÑO	504
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>706</b>
CONTINGENCIAS E INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	1017
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>1017</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>5.084</b>

### 3.3.4. ALTERNATIVA 4: PROCESO OUTOTEC ESCORODITA

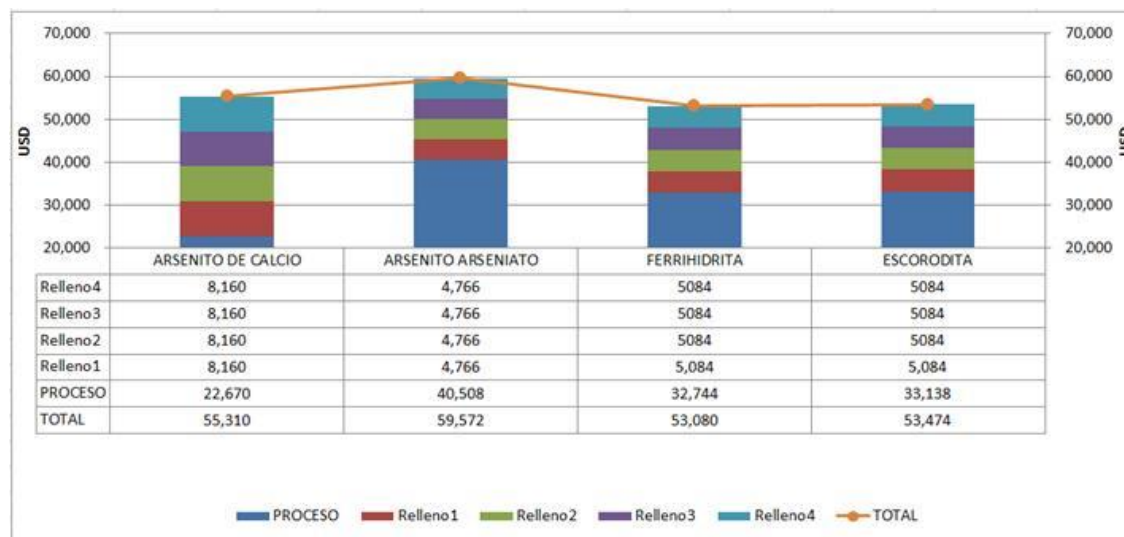
Tabla 3.3.8: Estimación de Capex Proceso Outotec Escorodita.

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: PROCESO OUTOTEC</b>	<b>KUSD</b>
<b>ESCORODITA</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
TRATAMIENTO EFLUENTES (PLANTA ACIDO)	
ALIMENTACION PLANTA	906
OXIDACION	714
NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN	5.984
ESPESAMIENTO FILTRACIÓN	2.652
NEUTRALIZACION FINAL-ESPESADO PULPA	1.936
DISPOSICIÓN DE POLVOS SIN TRATAR	1.834
<b>GENERAL Y SERVICIOS</b>	
OBRAS DE CONSTRUCCIÓN	3.095
ENERGÍA ELÉCTRICA Y CONTROL	2.062
SUMINISTRO AIRE COMPRIMIDO	287
SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE	687
TIE IN CAÑERÍAS Y VÁLVULAS	314
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>20.471</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
FLETES Y SEGUROS	1.228
REPUESTOS	409
ASESORIA DE VENDOR	307
COSTOS DE INGENIERÍA	1.024
COSTOS DEL DUEÑO	3.071
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>6.039</b>
CONTINGENCIAS	6.628
INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>6.628</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>33.138</b>

Tabla 3.3.9: Relleno de Seguridad proceso OUTOTEC Escorodita

<b>ESTIMACIÓN DE COSTOS: RELLENO DE SEGURIDAD</b>	<b>KUSD</b>
<b>PROCESO OUTOTEC - ESCORODITA</b>	
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
RELLENO DE SEGURIDAD	3.361
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>	<b>3.361</b>
<b>COSTO INDIRECTO</b>	
FLETES Y SEGUROS	0
REPUESTOS	0
ASESORIA DE VENDOR	34
COSTOS DE INGENIERÍA	168
COSTOS DEL DUEÑO	504
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>706</b>
CONTINGENCIAS E INTERFERENCIAS CON OPERACIÓN	1017
<b>TOTAL CONTINGENCIAS</b>	<b>1017</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>5.084</b>

Tabla 3.3.10: Resumen de los distintos CAPEX (Capital Expenditures)



De la anterior tabla se tiene que los costos de inversión de la alternativa 1 asciende a 55.310 KUSD, la alternativa 2 asciende a 59.572 KUSD, la alternativa 3 asciende a 53.080 KUSD, la alternativa 4 asciende a 53.474 KUSD.

Las consideraciones que se utilizaron son las siguientes:

Los rellenos de seguridad se deben construir por fases. Cada fase dura 5 años, son 4 fases en total, por lo que el proyecto dura 20 años.

El costo de inversión de relleno de seguridad se calcula para la fase 1 y luego se repite para las demás fases.

Debido a que los costos de inversión de los rellenos de seguridad para almacenar los residuos de los procesos son importantes en relación a los costos de inversión de las plantas de tratamientos, se muestran en forma separada.

### 3.4. COSTOS OPERACIONALES, OPEX.

Al tratar los efluentes no se lixivian los polvos. Estos deberán ser dispuestos en una bodega de aproximadamente 125x40m que considera una distribución de 640 maxisacos de 1 tonelada. Esto permite disponer 9 días de almacenamiento a una tasa de recuperación máxima de 70 ton/día de polvos. Sin embargo existe la posibilidad de apilar hasta 2 sacos en mismo lugar lo que permitiría extender hasta 18 días el período de almacenamiento. En esta opción no se considera los costos internos de traslado de polvo, ya que esto se hace en la actualidad.

Sin embargo del proceso de tratamiento de Efluentes se obtienen los siguientes subproductos para disposición final:

• Alternativa 1: ATP, Arsenito	269 ton/día
• Alternativa 2: ETP, Arsenito + Arseniato	152 ton/día
• Alternativa 3: ECOMETALES, Ferrihidrita	215 ton/día
• Alternativa 4: OUTOTEC, Escorodita	215 ton/día

Estos 4 subproductos podrán ser transportados a dependencias de Altonorte o a un tercero para su disposición final.

Se consideró que las instalaciones de este tercero, se encuentran a una distancia de 70 Km y que los subproductos serán trasladados en camiones de 25 ton a un costo de 1 USD/KmTon. Se considera también para la estimación de costos 365 días del año.

A continuación se presenta la tabla con insumos y sus costos en USD.

Tabla 3.4.1: Insumos y sus costos (en USD)

<b>INSUMO</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Unidad</b>
Energía Eléctrica Servicios + Iluminación	135	USD/MWh
Agua Lechada de Cal	0,52	USD/m3
Agua Preparación Floculante	0,52	USD/m3
Agua Filtros	0,52	USD/m3
Agua de Elución Columnas	0,52	USD/m3
Cal (80% CaO Libre)	200	USD/ton
Floculante para Espesamiento	8,92	USD/Kg
Sulfato Férrico	600	USD/ton
H2O2	0,8	USD/Kg
Vapor	35	USD/ton
Acido Sulfúrico	57	USD/ton
Diesel	250	USD/ton
Disposición Residuos	25550	USD/ton/año
<b>MANO DE OBRA</b>		
Supervisor (5x2)	120000	USD/año/persona
Operador Planta (7x7, 2día + 2noche =8)	60600	USD/año/persona
<b>MANTENCIÓN</b>		
Mantencción General	98750	USD/año
Telas para Filtro	6240	USD/Unidad

### 3.4.1. ALTERNATIVA 1: PROCESO ATP/ARSENITO DE CALCIO

Este proceso actualmente es utilizado en Chuquicamata y consiste en una neutralización del arsénico en dos etapas utilizando lechada de cal, con el objetivo de producir arsenito de calcio. Uno de los principales inconvenientes es que de las cuatro opciones evaluadas constituye el subproducto de arsénico más inestable. Es el que genera una mayor cantidad de residuos. En Chuquicamata el residuo sólido es dispuesto en el vertedero de Montecristo. En Altonorte, deberían generarse los permisos necesarios para abordar e implementar esta alternativa ya que requiere de un tratamiento y disposición especial.

Tabla 3.4.2: Estimación de OPEX Proceso ATP/Arsenito de Calcio sin Relleno de Seguridad.

			Alternativa1: ATP, Chuqui- Arsenito		
INSUMO	Precio U.	Unidad	Cantidad	Unidad	Costo/año
Energía Eléctrica Servicios + Iluminación	135	USD/MWh	4.493	MWh/año	606.555
Agua Lechada de Cal	0,52	USD/m3	79.820	m3/año	41.506
Agua Preparación Floculante	0,52	USD/m3	873	m3/año	454
Agua Filtros	0,52	USD/m3	15.951	ton/año	8.295
Agua de Elución Columnas	0,52	USD/m3	-	Kg/año	-
Cal (80% CaO Libre)	200	USD/ton	15.960	ton/año	3.192.000
Floculante para Espesamiento	8,92	USD/Kg	4.433	Kg/año	39.542
Sulfato Férrico	600	USD/ton	-		-
H2O2	1	USD/Kg	-		-
Vapor	35	USD/ton	-		-
Acido Sulfúrico	57	USD/ton	-		-
Diesel	250	USD/ton	-		-
Disposición Residuos	25.550	USD/ton/año	269		6.872.950
<b>MANO DE OBRA</b>					
Supervisor (5x2)	120.000	USD/año/persona	1	hombre	120.000
Operador Planta (7x7)	66.000	USD/año/persona	8	hombre	528.000
<b>MANTENCIÓN</b>					
Mantenimiento General	98.750	USD/año	1	año	98.750
Telas para Filtro	6.240	USD/Unidad	5	Unidad	31.200
					<b>11.539.252</b>

### **3.4.2. ALTERNATIVA 2: PROCESO ETP/ARSENITO + ARSENIATO**

Este proceso se encuentra implementado en El Teniente y consiste en una neutralización seguida de una precipitación, la cual requiere sulfato férrico y ácido sulfúrico, como materias que se obtienen de este proceso se encuentra una mezcla de Arsenito/Arseniato. Esta mezcla es posteriormente calcinada. Presenta un mayor costo de insumos que la alternativa anterior, sin embargo, los residuos generados son casi un 50% menos que la alternativa ATP.

La mezcla arsenito/arseniato es un poco más estable que el producto arsenito, requiere de disposición especial si la razón Ca/As baja de 4.

Tabla 3.4.3: Estimación de OPEX Proceso ATP/Arsenito de Calcio sin Relleno de Seguridad.

			Alternativa2: ETP, Arsenito + Arseniato		
INSUMO	Precio U.	Unidad	Cantidad	Unidad	Costo/año
Energía Eléctrica Servicios + Iluminación	135	USD/MWh	5.796	MWh/año	782.460
Agua Lechada de Cal	0,52	USD/m3	79.820	m3/año	41.506
Agua Preparación Floculante	0,52	USD/m3	1.703	m3/año	886
Agua Filtros	0,52	USD/m3	-	ton/año	-
Agua de Elución Columnas	0,52	USD/m3	-	Kg/año	-
Cal (80% CaO Libre)	200	USD/ton	19.947	ton/año	3.989.400
Floculante para Espesamiento	8,92	USD/Kg	6.246	Kg/año	55.714
Sulfato Férrico	600	USD/ton	1.657		994.200
H2O2	1	USD/Kg	-		-
Vapor	35	USD/ton	-		-
Acido Sulfúrico	57	USD/ton	507		28.899
Diesel	250	USD/ton	4.903		1.225.750
Disposición Residuos	25.550	USD/ton/año	152		3.883.600
<b>MANO DE OBRA</b>					
Supervisor (5x2)	120.000	USD/año/persona	1	Hombre	120.000
Operador Planta (7x7)	66.000	USD/año/persona	8	Hombre	528.000
<b>MANTENCIÓN</b>					
Mantencción General	98.750	USD/año	1	Año	98.750
Telas para Filtro	6.240	USD/Unidad	5	Unidad	31.200
					<b>11.780.365</b>

### **3.3.5. ALTERNATIVA 3: PROCESO ECOMETALES/FERRIHIDRITA**

Este proceso es más conocido como Producción de Ferrihidrita de Arsénico y es uno de los procesos más utilizados debido a que en su primera parte lleva a cabo la oxidación de Arsénico, llevándolo de  $As^{+3}$  a  $As^{+5}$ , estado en el cual presenta una mayor estabilidad. Este proceso genera un mayor contenido de residuos que la opción ETP (casi en el orden del proceso ETP) y el gasto por insumos eleva casi al doble el costo OPEX de esta alternativa con respecto a las dos anteriores.

Tabla 3.4.4: Estimación de OPEX Proceso Ecometales/Ferrihidrita.

INSUMO	Precio U.	Unidad	Alternativa3: Ecometal, Ferrihidrita		
			Cantidad	Unidad	Costo/año
Energía Eléctrica Servicios + Iluminación	135	USD/MWh	6.411	MWh/año	865.485
Agua Lechada de Cal	0,52	USD/m3	74.111	m3/año	38.538
Agua Preparación Floculante	0,52	USD/m3	1.612	m3/año	838
Agua Filtros	0,52	USD/m3	162.326	ton/año	84.410
Agua de Elución Columnas	0,52	USD/m3	-	Kg/año	-
Cal (80% CaO Libre)	200	USD/ton	19.947	ton/año	3.989.400
Floculante para Espesamiento	8,92	USD/Kg	5.238	Kg/año	46.723
Sulfato Férrico	600	USD/ton	8.121		4.872.600
H2O2	1	USD/Kg			698
			873		
Vapor	35	USD/ton	79.484		2.781.940
Acido Sulfúrico	57	USD/ton	-		-
Diesel	250	USD/ton	-		-
Disposición Residuos	25.550	USD/ton/año			5.493.250
			215		
<b>MANO DE OBRA</b>					
Supervisor (5x2)	120.000	USD/año/persona	1	hombre	120.000
Operador Planta (7x7)	66.000	USD/año/persona	8	hombre	528.000
<b>MANTENCIÓN</b>					
Mantencción General	98.750	USD/año	1,11	año	109.613
Telas para Filtro	6.240	USD/Unidad	5	Unidad	31.200
					18.962.694

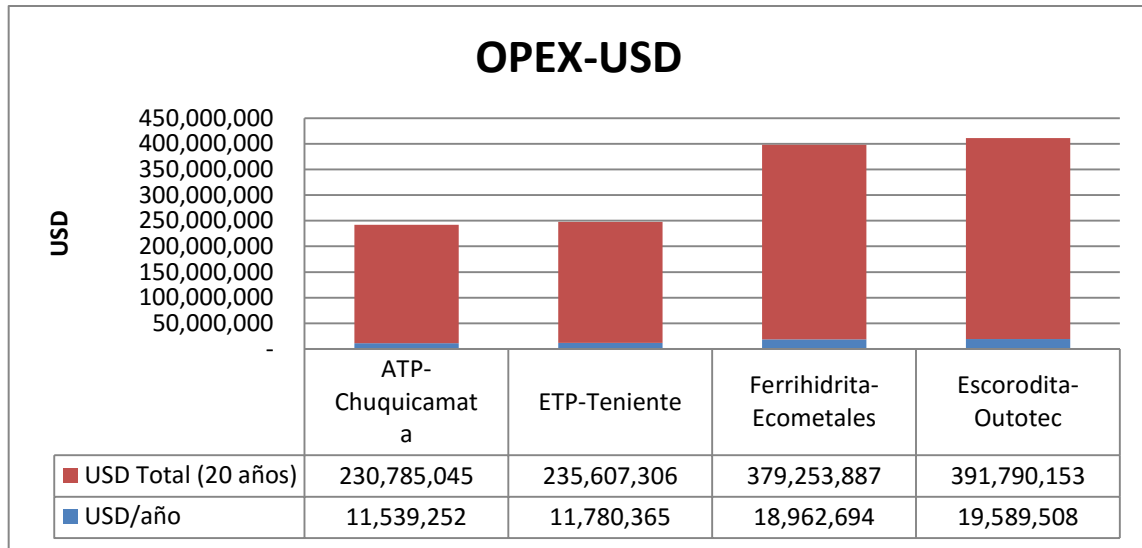
### **3.3.6. ALTERNATIVA 4: PROCESO OUTOTEC ESCORODITA**

Este proceso produce Escorodita, que es el compuesto más estable de arsénico. La cantidad de residuos obtenidos y el costo por insumos, son similares a la alternativa anterior. Las diferencias se evidencian en los costos CAPEX por disponer de una alternativa que asegure un compuesto de mayor estabilidad.

Tabla 3.4.5: Estimación de OPEX Proceso Outotec/Escorodita.

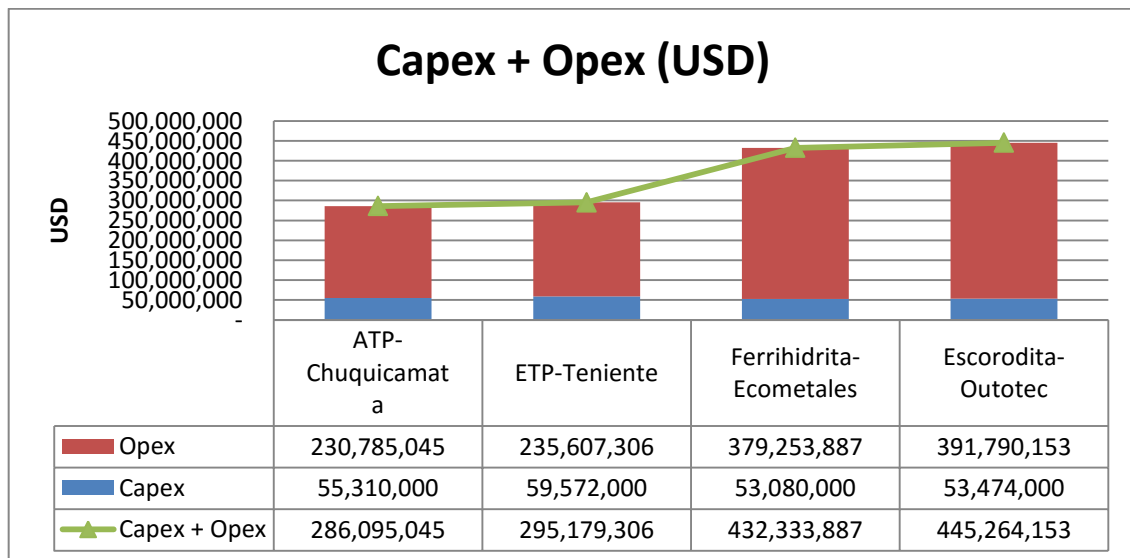
INSUMO	Precio U.	Unidad	Alternativa4: Outotec, Escorodita		
			Cantidad	Unidad	Costo/año
Energía Eléctrica Servicios + Iluminación	135	USD/MWh	6.757	MWh/año	912.195
Agua Lechada de Cal	0,52	USD/m3	74.111	m3/año	38.538
Agua Preparación Floculante	0,52	USD/m3	1.612	m3/año	838
Agua Filtros	0,52	USD/m3	162.494	ton/año	84.497
Agua de Elución Columnas	0,52	USD/m3	-	Kg/año	-
Cal (80% CaO Libre)	200	USD/ton	19.947	ton/año	3.989.400
Floculante para Espesamiento	8,92	USD/Kg	8.126	Kg/año	72.484
Sulfato Férrico	600	USD/ton	8.121		4.872.600
H2O2	1	USD/Kg	873		698
Vapor	35	USD/ton	93.789		3.282.615
Acido Sulfúrico	57	USD/ton	940		53.580
Diesel	250	USD/ton	-		-
Disposición Residuos	25.550	USD/ton/año	215		5.493.250
<b>MANO DE OBRA</b>					
Supervisor (5x2)	120.000	USD/año/persona	1	hombre	120.000
Operador Planta (7x7)	66.000	USD/año/persona	8	hombre	528.000
<b>MANTENCIÓN</b>					
Mantenimiento General	98.750	USD/año	1,11	año	109.613
Telas para Filtro	6.240	USD/Unidad	5	Unidad	31.200
					<b>19.589.508</b>

Tabla 3.4.6: Resumen de los distintos OPEX (Operational Expenditures).



En la tabla anterior se muestra el Opex anual y también la proyección de costos en el final de la vida útil del proyecto a 20 años.

Tabla 3.4.7: Resumen de Costos



En esta última tabla se visualiza la suma de costos de operación OPEX y los costos de capital CAPEX, considerando un plazo de 20 años.

## CONCLUSIONES

Con la información obtenida podemos decir que a medida que la minería avanza en el tiempo, los concentrados poseen mayor cantidad de impurezas, los llamados concentrados complejos, con altos contenidos de Arsénico. Estos contaminantes se trasladan en la corriente gaseosa de la fundición, los que necesitan ser abatidos en las plantas de ácido y recuperado en la solución efluente. Posteriormente el arsénico debe ser tratado para su disposición final, ya que las fundiciones, están reguladas por ley de la República de Chile para la emisión de contaminantes a la atmosfera.

Se tiene que la legislación ambiental cada vez es más restrictiva en términos de barreras para la emisión de contaminantes que afecten a la salud de las personas.

Analizado el problema operacional de Altonorte, quien a la fecha no realiza tratamiento de sus efluentes de manera de ser depositados en forma estable, si Lomas Bayas no recibe el efluente con contenido arsenical rápidamente entrará en una imposibilidad de producir cobre refinado ya que la legislación actual y el monitoreo permanente obligarán a paralizar la operación.

Altonorte deberá implementar una alternativa de tratamiento de efluentes y disposición de los residuos, con lo que deberá realizar una inversión (CAPEX) que finalmente impactará en el Budget de inversiones de la fundición.

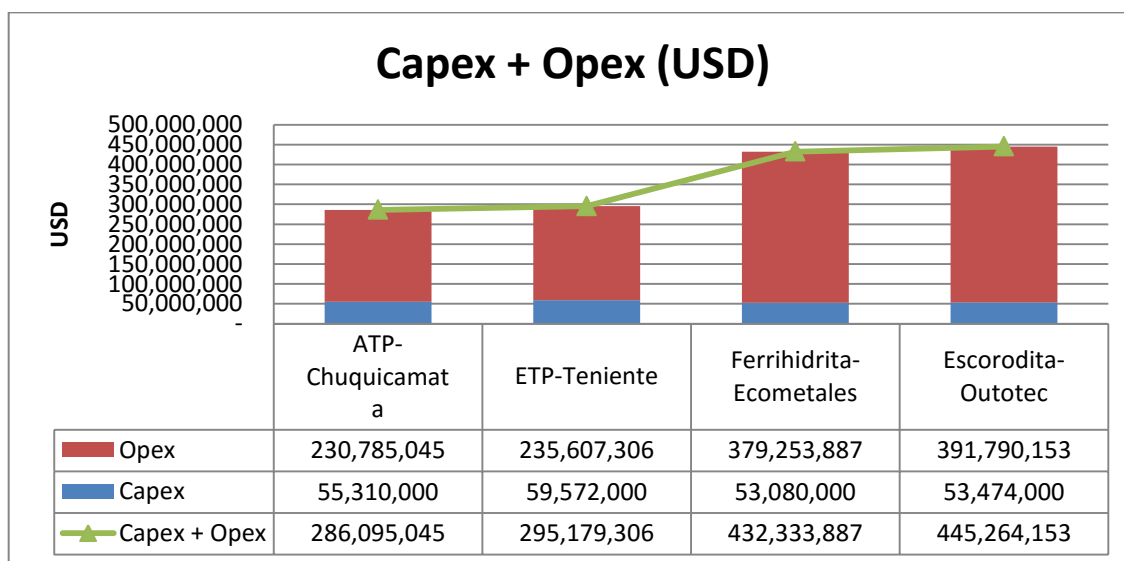
Estimamos que el monto de inversión CAPEX, se enmarcará entre los 53,48 MM USD a los 55,3 MM USD en un plazo de 20 años de vida útil, considerando las cuatro etapas (5 años cada una) de relleno de seguridad para disposición final de los residuos contaminantes ya estabilizados.

Una vez revisada la información del estado del arte de los procesos para abatimiento de Arsénico en la teoría como también los modelos de tratamientos implementados en la industria, se puede visualizar que los procesos que cumplen desde nuestro punto vista de los criterios técnicos, medioambientales y legales son:

- Alternativa 1: Proceso ATP/Arsenito de Calcio
- Alternativa 2: Proceso ETP/Arsenito + Arseniato
- Alternativa 3: Proceso Ecometales/Ferrihidrita
- Alternativa 4: Proceso Outotec/Escorodita.

Al comparar las distintas alternativas de tratamiento de efluentes, se tiene que Alternativa 1 es técnicamente la menos estable bajo condiciones ambientales de humedad, hasta llegar a la Alternativa 4 que es la que tiene mejor comportamiento en el largo plazo, ya que el arsénico es llevado a su estado pentavalente  $As^{+5}$ , que presenta la mejor estabilidad en el test TCLP 1311 de la EPA, con el que se mide la contaminación del suelo junto a los sectores de acopio.

Para estos procesos se determinan los CAPEX y OPEX de inversión desde un punto de vista conceptual, en que se obtienen los siguientes resultados:



Los procesos mencionados son una real alternativa de aplicación para Altonorte, desde nuestro punto de vista la opción de proceso a aplicar es la alternativa ETP/Arsenito – Arseniato que actualmente opera en División El Teniente, es una opción técnica de fácil operación e implementación, que cumple con la normativa ambiental

vigente, que además genera un costo de operación que está por debajo de alternativas como la producción de Ferrihidrita y Escorodita.

La implementación de una alternativa de proceso que reemplace al envío de efluente como PLS a Lomas Bayas son poco atractivas económicamente como negocio global, se concluye que siempre será beneficioso operar la fundición con alguna mina de óxidos de Cu, con el fin de neutralizar el efluente con el mineral, reduciendo de esta manera el costo de consumo de cal y favorecer la reducción de OPEX de la mina por menor costo en compra de ácido y agua.

Con el fin de reducir el impacto del OPEX de Fundición, al revisar la información de los procesos se puede vislumbrar la factibilidad de recuperar otros materiales valiosos como Cu, Zn, Bi y Re, donde la cuantificación de dicha rentabilidad puede ser considerado como tema de otro estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

- IATAGAKI and YAZAWA. (1983). Thermodynamic Evaluation Of Distribution Behavior of Arsenic, Antimony and Bismuth in Copper Smelting, Proceedings of the 1983. International Sulfide Smelting Symposium, San Francisco, California, TMS-AIME, Vol. 1. pp. 119-142.
- YAZAWA. (1974). Thermodynamic consideration of copper smelting, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 13. pp. 443-453.
- AJIMA, HAYASHI & SHIMIZU. (1994). Copper Smelting and refining at Naoshima. Paper presented at the One-day Symposium 1994, Institute for Advanced materials processing, Tohoku University, June 24. 1994.
- DEMOPOULUS, G. P., DROPPERT, D.J. and VAN WEERT, G. (1994). Options for the immobilization of Arsenic As Crystalline Scorodite. Impurity Control And Disposal in Hydrometallurgical Process, B. Harris And Krause (Editors), CIM, Montreal, Canada. pp. 57-69.
- DROPPERT, D. J. (1999). The Ambient Pressure Precipitation of Crystalline Scorodite ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) from sulphate solutions. Master of Engineering Thesis, Dep. of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal, Canada.
- DUTRIZAC, J. E., JAMBOR, J. L. and CHEN, T.T. (1987). The behavior of Arsenic during jarosite Precipitation: Reaction at  $150^\circ\text{C}$  and the Mechanism of Arsenic Precipitation. Canadian Metallurgy Quarterly, Vol. 26, No. 2, April-june. p.p. 103-115.
- EDELSTEIN, D.L. (1994). Arsenic. Minerals Yearbook, U.S. Bureau of Mines. <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/arsenic/160494.pdf>> p.p.77-80.
- FARIAS, L., REGHEZZA, A. y CRUZ, A. (1993). Tratamiento Hidrometalúrgico de Polvos de Fundición en la División Chuquicamata de Codelco-Chile: Situación Actual y perspectivas. III Jornadas de metalurgia del Norte Grande, Antofagasta, Chile.
- FARIAS, L., REGHEZZA, A., CRUZ, A., MATTA, J., y GUZMAN, A. (1996). Arsenic Confinement in Chuquicamata Hydrometallurgical Processes. III

International Conference on Clean Technology for the Mining Industry. M. A. Sanchez, F. Vergara and S.H. Castro (Editors), University of Concepcion, Chile. p. p. 315-321.

- HATCH, (2013). Informe Técnico - Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte, realizado en marzo 2013.
- HATCH, (2013). Informe Técnico - Definición de Alternativas de Tratamiento de Efluentes Ácidos y PLS Altonorte, marzo 2013.
- MANUAL de OPERACION de las Plantas de Abatimiento de As El Teniente. (2003).
- INTERNATIONAL Agency for Research on Cancer. (2014). Evidence for carcinogenicity to humans (sufficient).  
<<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/suppl7/Suppl7-19.pdf>>.