

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
QUÍMICO

**DISEÑO DE PLANTA DE LIXIVIACIÓN EN PILA PARA LA
UNIDAD DE PROCESOS HIDROMETALURGICOS.
CODELCO, DIVISIÓN TENIENTE.**

Cristián Álvarez Vásquez

Profesor Guía:

Jorge Santana Cardo
José Torres Titus

2015

Resumen Ejecutivo

La presente tesis consiste en el desarrollo de pruebas experimentales para la extracción del Cobre en los minerales Sulfurados.

El objetivo central es la extracción del ion Cúprico, tomando en cuenta las variables que pueden interferir para su extracción.

Para lograr lo anteriormente descrito se recopiló información tanto a nivel global como específico.

Es importante señalar que los datos globales que se tomaron fueron tesis, informes de experimentos anteriores que se realizaron. Los estudios experimentales son las principales bases de esta tesis.

La tesis consta de 10 capítulos en los que se estudiaron distintos tópicos, según la importancia que reporte el estudio, este se limitó al estudio de la extracción de Sulfuros de Cobre que contienen los polvos y que son generados en la Fundición.

El capítulo dos describe la Unidad de Procesos Hidrometalúrgicos donde se realizan los procesos de lixiviación, extracción por solvente y electro-obtención.

El capítulo tres describe la Planta de Tratamientos de Polvos Finos de la planta y es donde centraremos nuestra tesis específicamente en el tópico de lixiviación.

El capítulo cuatro hace referencia a los objetivos generales y específicos de la tesis para llevar a cabo el estudio.

El capítulo cinco describe la caracterización de los polvos que se utilizaron para los ensayos. Características químicas, mineralógicas, Físicas, etc.

El capítulo seis hace referencia a los tipos de ensayos que se realizaron para observar las propiedades cualitativas que tienen los polvos para luego aumentar luego la escala de ensayos.

El capítulo siete describe el diseño de las columnas y su montaje para los ensayos respectivos, seguido con los procedimientos y análisis de cada columna, observando sus cinéticas, extracción, residuos, etc.

El capítulo ocho es la descripción del balance de masa en la planta de Hidrometalurgia.

El capítulo nueve describe la evaluación financiera que se le da al proyecto de la tesis analizando su viabilidad en el tiempo.

Capitulo diez se entrega las conclusiones observadas por el estudiante en el transcurso de la memoria junto con las recomendaciones para un eventual levantamiento del proyecto.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Documentos para la Tesis	3
1.1.1 Lixiviación de concentrados de Cobre utilizando Cloruro de Sodio y el Cobre soluble aportado por el mismo concentrado. (1)	3
1.1.2 Lixiviación de concentración de Cobre con alto contenido de Arsénico en medio Cloruro-Cloruro. (2)	5
2. UNIDAD DE PROCESOS HIDROMETALURGICOS. (U.P.H).....	6
2.1 Planta de tratamientos de polvos finos:	6
2.2 Extracción por solvente (SX)	7
2.3 Electro-Obtención	8
3. PLANTA DE TRATAMIENTOS DE POLVOS FINOS	10
3.1 Etapa de Lixiviación Estándar	11
3.2 Etapa de lixiviación de Bismuto	11
3.3 Etapa de Precipitación de Arsénico	12
4. OBJETIVOS.....	15
4.1 Objetivo General.....	15
4.2 Objetivos Específicos	15
5. CARACTERIZACIÓN DE LOS POLVOS:.....	18
5.1 Características químicas.	18
5.2 Características mineralógicas.....	19
5.3 Características Físicas	20
5.3.1 Humedad de los Polvos	20
5.3.2 Densidad Aparente	20
5.3.3 Distribución Granulométrica.....	21
5.4 Análisis Granulométrico.....	23

6. ENSAYOS.....	24
6.1 Ensayo Iso-pH.....	24
6.2 Ensayos de Lixiviación agitada (escala de laboratorio).....	26
6.3 Ensayos de tasa de irrigación.....	29
6.4 Disolución Másica.....	29
6.5 Aglomerado.....	30
6.6 Lixiviación por Irrigación.....	31
6.7 Estimación Estequiometrica.....	31
7. COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN.....	32
7.1 Diseño de Columnas de un sistema abierto.....	32
7.2 Resultado del montaje columnas de lixiviación.....	33
7.3 Lixiviación en Columnas.....	34
7.4 Aglomeración de Muestras.....	35
7.5 Análisis lixiviación columnas.....	36
7.6 Lixiviación Columna Épsilon.....	36
7.7 Cinética de lixiviación columnas.....	37
8. BALANCE DE MASA.....	40
8.1 Capacidad de la planta.....	40
8.2 Balance de Masa.....	42
8.3 Descripción del proceso de lixiviación en Pila propuesto en este trabajo....	45
8.4 Diagrama de flujo.....	46
8.5 Descripción de Equipos Requeridos.....	47
9. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PRODUCTO.....	49
9.1 Valor del producto.....	49
9.2 El cobre y la economía Chilena.....	50
9.3 El aporte de Codelco.....	50

9.4 El precio del cobre y las finanzas públicas	50
9.5 Costo de equipos.....	51
9.6 Costo de operación	53
9.7 Consumos energéticos	53
9.8 Consumos de Cloruro de Sodio.....	54
10. CONCLUSIONES	60
10.1 Análisis entre columnas.....	61
10.2 Recomendaciones.....	61
11. BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS:.....	64
ANEXO A:.....	65
A-1 Diagrama de Estabilidad Eh-pH (Pourbaix)	65
A-2 Arsénico.....	70
A-2.1 Generación de Arsénico en la planta.....	70
A-2.2 El arsénico como veneno	70
A-2.3 Como se trata su eliminación	70
A-2.4 Vertidos Controlados	71
A-3Aglomeración	73
A-3.1 Curado con ácido	73
A-3.2 Efecto de la ganga en el grado de penetración de las partículas.	76
A-3.3 Tipos de aglomerado:.....	77
A-3.4 Características y factores de la aglomeración.....	78
A-3.5 Medio ácido	79
A-3.6 Equipos Aglomerantes	79
A-4 Estabilización del Arsénico.	80
A-4.1 Química de la lixiviación Estándar.....	80
A-4.2 Lixiviación del Cobre	80
A-4.3 Lixiviación del Hierro	81
A-4.4 Lixiviación del Arsénico	81

A-4.5 Química de Lixiviación de Bismuto.....	82
A-4.6 Química de la precipitación de Arsénico	82
A-5 Lixiviación	84
A-5.1 Factores que intervienen en una lixiviación	84
A-5.2 Descripción general de los métodos de Lixiviación Cupríferos.	85
A-5.3 Disolución de metales.	87
A-5.4 Agentes de lixiviación	88
A-6 Consumo de ácido Sulfúrico.	89
A-7. Cinética de lixiviación.....	91
A-7.1 La reacción general que describe la lixiviación es:.....	92
A-7.2 Esquema de las etapas de lixiviación.....	93
ANEXO B.....	94
B-1. Procedimientos de laboratorio	94
B-2 Estimación estequiometrica de Cloruro de Sodio	95
B-3. Calculo de reactivos para aglomeración del mineral.....	96
ANEXO C.....	99
C-1 Registro fotográfico trabajo experimental	99
ANEXO D.....	102
D-1. Análisis granulométrico.....	102
D-2 Resultados análisis químicos muestras cabeza	104
D-3 Análisis químico a Residuos de lixiviación agitada	106
D-4 Resultados experimentales lixiviación agitada Polvos CT.	107
D-5 Resultados experimentales Balance de masa pruebas Iso-pH.....	108
D-6 Resultados experimentales extracción y recuperación de Cobre.	109
D-7 Resultados experimentales extracción y recuperación de Cobre.	112

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Promedio de análisis Químicos de polvos meses junio a Octubre.</i>	18
<i>Tabla 2. Características mineralógicas de los Polvos de CT.</i>	19
<i>Tabla 3. Características mineralógicas de los Polvos de CPS.</i>	19
<i>Tabla 4. Los consumos de ácido.</i>	25
<i>Tabla 5. Consumo de ácido Mezcla de polvos.</i>	25
<i>Tabla 6. Flujos de irrigación para los polvos Teniente y Pierce-Smith.</i>	29
<i>Tabla 7. Disolución másica de los Polvos CT y CPS.</i>	29
<i>Tabla 8. Concentración de Cu⁺⁺, para pruebas de lixiviación por irrigación.</i>	31
<i>Tabla 9. Balance de masa</i>	44
<i>Tabla 10. Costos de equipos con sus valores CIF.</i>	51
<i>Tabla 11. Costo instalación de equipos.</i>	52
<i>Tabla 12. Total de Capital de Inversión.</i>	52
<i>Tabla 13. Costos Indirectos.</i>	53
<i>Tabla 14. Total Capital de Inversión.</i>	53
<i>Tabla 15. Consumos energéticos del sistema de lixiviación.</i>	53
<i>Tabla 16. Balance final al arsénico de los residuos en la lixiviación</i>	71
<i>Tabla 17. Mineral, aglomerante y tipo de aglomeración para el mineral</i>	79
<i>Tabla 18. Evolución del mercado chileno del ácido sulfúrico 2004-2013, miles de toneladas.</i>	90
<i>Tabla 19. Granulometría de los polvos gruesos provenientes de las cámaras de enfriamiento de los convertidores Teniente.</i>	102
<i>Tabla 20. Granulometría de los polvos gruesos provenientes de las cámaras de enfriamiento de los convertidores Pierce-Smith</i>	103
<i>Tabla 21. Análisis químico de Cabeza a los polvos por separado L-8617</i>	104
<i>Tabla 22. Muestras cabezas y muestras lixiviadas L-8667</i>	104
<i>Tabla 23. Muestras Cabezas L-8594</i>	104
<i>Tabla 24. Análisis químico, muestras Cabeza L-8617</i>	105
<i>Tabla 25. Granulometría L-8618, cabezas polvos CPS</i>	105
<i>Tabla 26. Granulometría L-8618 cabezas polvos Teniente</i>	106
<i>Tabla 27. Análisis químico Residuo L-8594</i>	106
<i>Tabla 28. Análisis químico, residuo L-8645</i>	106
<i>Tabla 29. Concentración PLS L-8594</i>	106

<i>Tabla 30. Concentración PLS L-8634</i>	107
<i>Tabla 31. Concentración PLS L-8668</i>	107
<i>Tabla 32. Cinética de reacción, muestras de Polvos CT con ácido sulfúrico a 25°C y presión atmosférica</i>	107
<i>Tabla 33. Cinética de reacción, muestras de Polvos CT con ácido sulfúrico y cloruro de sodio a 25°C y presión atmosférica</i>	108
<i>Tabla 34. Balance de masa L-8594</i>	108
<i>Tabla 35. Cobre extraído</i>	108
<i>Tabla 36. Cobre presente en las muestras cabezas</i>	108
<i>Tabla 37. Extracción y recuperación de Cobre columna Alfa</i>	109
<i>Tabla 38. Extracción y recuperación de Cobre columna Beta</i>	109
<i>Tabla 39. Extracción y recuperación de Cobre columna Gamma</i>	110
<i>Tabla 40. Extracción y recuperación de Cobre columna Delta</i>	110
<i>Tabla 41. Extracción y recuperación de Cobre columna Épsilon</i>	111
<i>Tabla 42. Extracción y recuperación de Cobre columna Omega</i>	111
<i>Tabla 43. Potencial de las columnas durante la lixiviación</i>	112
<i>Tabla 44. pH de las columnas durante la lixiviación</i>	112

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Esquema donde provienen los polvos Finos y Gruesos en la Fundición.</i>	2
<i>Figura 2. Recuperación de Cobre por extracción por solvente. (SX)</i>	7
<i>Figura 3. Esquema de la Planta de procesos Hidrometalurgicos (U.P.H).</i>	9
<i>Figura 4. Esquema de la planta de tratamientos de polvos fundición.</i>	14
<i>Figura 5. Consumo de ácido:</i>	24
<i>Figura 6. Modelo de Columnas de medio metro de largo y 20 cm de diámetro. ...</i>	32
<i>Figura 7. Tonelajes mensuales del Convertidor Teniente</i>	40
<i>Figura 8. Tonelajes Mensuales del Convertidor Pierce-Smith.</i>	41
<i>Figura 9. Balance generado hecho para un mes de tratamiento por lixiviación en pila, tambor aglomerador.</i>	42
<i>Figura 10. Balance generado hecho para un mes de tratamiento por lixiviación en pila, pila de lixiviación.</i>	43
<i>Figura 11. Diagrama de flujo con un sistema de lixiviación en pila propuesto a la U.P.H.</i>	46
<i>Figura 12. Diagrama de estabilidad del sistema Cu-H₂O, a 25 °C.</i>	66
<i>Figura 13. Diagrama de estabilidad del sistema Fe-H₂O a 25°C.</i>	67
<i>Figura 14. Diagrama de estabilidad del sistema Cu-Cl-H₂O a 25°C.</i>	68
<i>Figura 15. Diagrama de estabilidad del sistema Fe-Cl-H₂O a 25°C.</i>	69
<i>Figura 16. Recuperación de cobre en presencia de ganga.</i>	76
<i>Figura 17. Tambor aglomerador.</i>	80
<i>Figura 18. Etapas del proceso de lixiviación para óxidos y sulfuros de Cobre.</i>	92
<i>Figura 19. Proceso de lixiviación, cambio de control con el tiempo.</i>	93

Índice de imágenes

Imagen 1. Harnero de Tyler.....	21
Imagen 2. Polvos Gruesos antes de Aglomeración, día 0.....	30
Imagen 3. Polvos Gruesos aglomerados, día 7.....	30
Imagen 4. Columnas montadas para pruebas de lixiviación a condiciones de 1 atm y 25 [°C].....	33
Imagen 5. Montaje de columnas en el laboratorio de operaciones unitarias.....	99
Imagen 6. Filtros para las columnas que se montaron en el laboratorio.....	99
Imagen 7. Muestra de polvo convertidor Teniente sin aglomerar, día 0.....	100
Imagen 8. Muestra de polvos convertidor teniente después de agregar ácido para la aglomeración.....	100
Imagen 9. Muestra de polvo convertidor Teniente y Pierce Smith antes de la aglomeración, día 0.....	101

NOMENCLATURA

SX:	Extracción por solvente
EW:	Electro-obtención (Electrowinning)
PLS:	Solución rica en Cobre (Pregnant Liquid Solution)
m:	Metros
ppm:	Partes por millón
ton:	Toneladas
g/L:	Gramos por litro
t:	tiempo
CT:	Convertidor Teniente
CPS:	Convertidor Pierce-Smith
PPEE:	Precipitadores electroestáticos
UPH:	Unidad de Procesos Hidrometalurgicos
Min:	minutos
PTPF:	Planta de Tratamientos Polvos Finos
TMS:	Tonelada métrica Seca
CLP:	Valor Pesos Chilenos
CuT:	Cobre Total
CuNS:	Cobre No Sulfuro
CuS:	Cobre Sulfurado

1. INTRODUCCIÓN

La extracción por Hidrometalurgia de minerales, es ampliamente usada en la industria minera por su efectividad y bajo costo. En este proceso, se diferencian dos tipos de minerales principalmente, los óxidos y sulfuros, siendo los sulfuros más difíciles de lixiviar por sus estructuras refractarias, por lo que se necesitan reactivos (Cloruro de Sodio [NaCl], Sulfato Férrico [Fe₂(SO₄)₃]) que actúen como catalizador para obtener extracciones más altas de Cobre.

Actualmente en la Unidad de Procesos Hidrometalurgicos (U.P.H.), se tratan los polvos finos a través de lixiviación agitada en un reactor con ácido Sulfúrico.

En CODELCO, División TENIENTE, se estudió el impacto que puede producir implementar pilas de lixiviación para los polvos gruesos que son generados en la fundición. Estos polvos, tienen una ley alta de cobre que es aproximadamente de 40% de Cobre total (CuT) para el Convertidor Teniente (CT) y puede alcanzar hasta un 80% CuT para el Convertidor Pierce-Smith (CPS). En el presente trabajo se analizó la extracción de Cobre en los polvos por lixiviación en pila a diferentes condiciones de ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio, observando su efecto en los polvos, éste fue positivo logrando recuperaciones hasta de un 79%, Columna Épsilon. Para esto, se realizaron pruebas y ensayos con los polvos, de tal modo, de obtener sus características cualitativas (adhesión en el aglomerado, percolación, mineralogía.) y cuantitativas (% de Cobre, Arsénico, disolución másica). Estos ensayos nos entregaron el apoyo para el montaje de las columnas y la realización de la lixiviación en ellas. Además, con los resultados se hizo una comparación de la efectividad del reactivo.

Y por último, en la Fundición, específicamente en el sector de Manejo de Gases (MA-GA), existen dos formas de captar los polvos, una de ellas es capturar los polvos finos con los precipitadores electrostáticos (PPEE), y la otra forma, es capturarlos en las cámaras de enfriamiento que se encuentran en los convertidores Tenientes y Pierce Smith (CT y CPS), cómo se muestra en la figura 1, página 2.

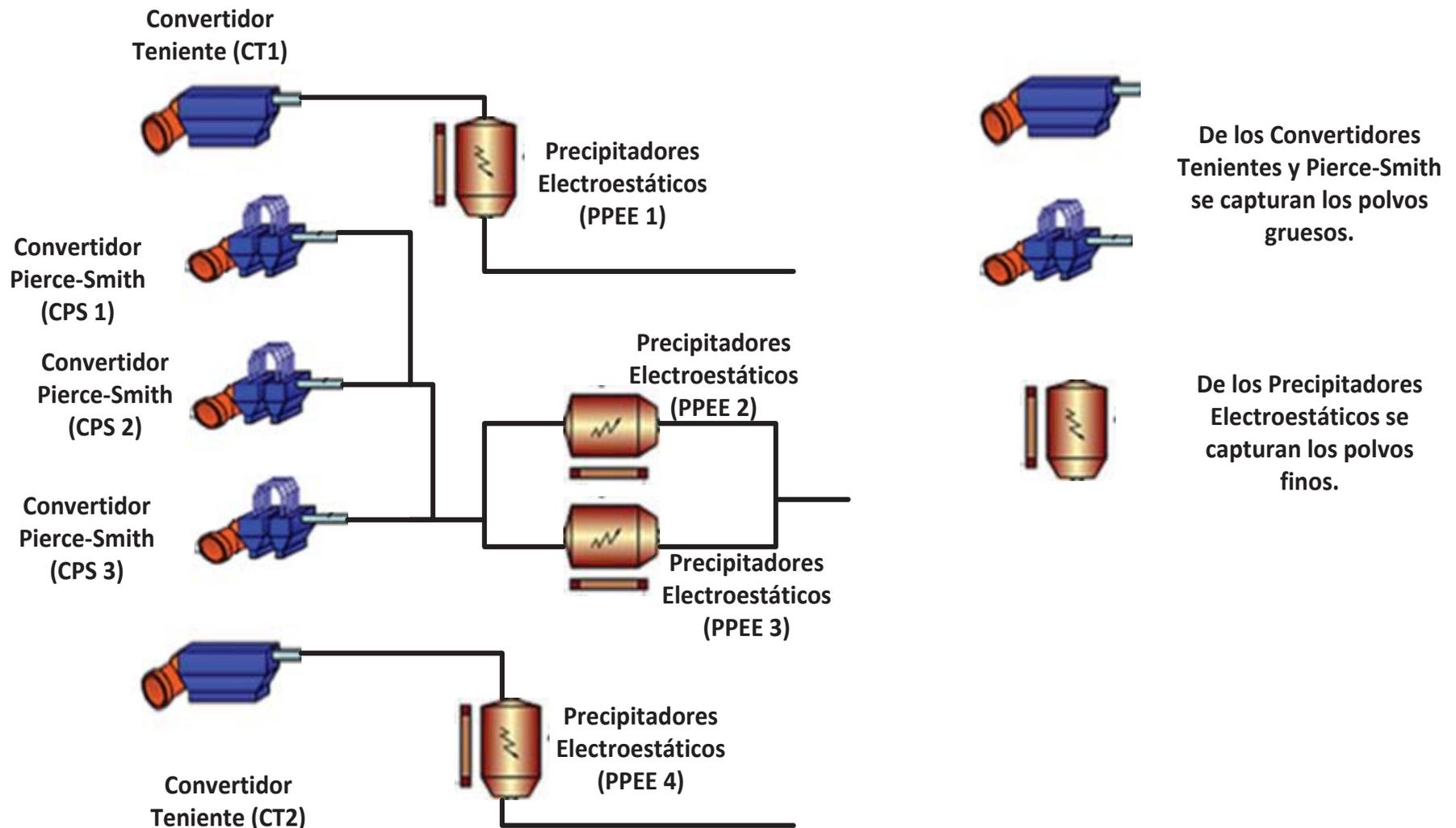


Figura 1. Esquema donde provienen los polvos Finos y Gruesos en la Fundición.

1.1 Documentos para la Tesis

1.1.1 Lixiviación de concentrados de Cobre utilizando Cloruro de Sodio y el Cobre soluble aportado por el mismo concentrado. (1)

La lixiviación de concentrados por cloro-complejos cúpricos cada vez es más aceptada y sus estudios anteceden desde fines del siglo XIX. Pero su aplicación comenzó hace pocos años, ya que en este tiempo se han descubierto y fabricados polímeros resistentes a la corrosión que genera el proceso de lixiviación.

Dentro de los estudios que se han realizado se han estudiado variables muy importantes que al momento de hacer los experimentos se deben tomar en cuenta como: Concentración de Cloruro, concentración de Cobre soluble, tiempo de lixiviación, porcentaje de sólidos en la disolución, temperatura.

Existen muchos métodos de lixiviación de Sulfuros de Cobre, como la lixiviación en medio amoniacal, sulfúrica y bacteriana las que se usan en otras mineras. El proceso que analizaremos es el de lixiviación en sistemas clorurados que utilizan CuCl_2 , FeCl_3 y NaCl , etc.

- Proceso CLEAR (1): Primera etapa
 - Disolución de NaCl + KCl , 10% sólidos, 103-107 [°C]Segunda etapa
 - Lixiviación a 150[°C] y 3,4 [atm.]
- Proceso CYMET: Lixiviación con altas concentraciones de cloruro (2,82 a 6,21 molar)
 - y concentraciones de Cobre soluble (0,79 a 1,46 molar)
- Proceso CATHOR: Se calienta el concentrado con azufre a 400 [°C]
 - y pasa a tres etapas de lixiviación a 106 [°C]
- Proceso CUPROCHLOR (1) (para procesos en pilas)
 - Utiliza cloruro de Calcio como reactivo y aglomerante por el aporte de Cloruro
 - La disolución lixivante contiene concentraciones 90 [g/l] de Cloruro y 5 [g/l] de ion cúprico

- En este proceso se asume que ocurre la reacción
- $\text{Fe}^{2+} + \text{Cu}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Cu}^+$
- La que ayuda a la lixiviación de los Sulfuros de Cobre.

La propuesta del estudio es la lixiviación con Cloruro de Sodio (NaCl), en condiciones normales de temperatura y presión (25 [°C] y 1[atm]) y Cobre soluble generado por el mismo mineral.

A partir de la información se abre la hipótesis de la generación de Cloro-complejos cúpricos a partir del Cobre soluble y termodinámicamente la reacción predominante debe ser:



En un sistema de Cu^{2+} , Cl^- y CuCl^+ podemos disolver sulfuros.

Las pruebas se realizaron por lixiviación agitada con un reactor de un litro y una paleta resistente a la corrosión, pH-metro y voltímetro.

Estas pruebas entregaron los siguientes resultados.

$\Delta [\text{Cloruro}]$: 10-25 [g/l]

$\Delta [\text{Sólidos}]$: 10-30 %de sólidos

Al aumentar el CuCl^+ , aumento la extracción de Sulfuros de Cobre. Por lo tanto se asume que es el principal agente que ayuda a la lixiviación.

Por lo tanto la principal reacción en la lixiviación es:



Concluyendo que para condiciones ambientales (1 [atm], 25 [°C]) la disolución tiene las siguientes características:

- 15-35 [g/l] de ion cúprico
- 2-5 [g/l] de ácido libre
- 10-12 [g/l] de Cloruro

¹ HSC Chemistry: Software para reacciones químicas, balances, estequiometría.

1.1.2 Lixiviación de concentración de Cobre con alto contenido de Arsénico en medio Cloruro-Cloruro. (2)

El estudio de concentrados con contenido de Arsénico en un medio cloruro es importante porque el arsénico es un agente tóxico para el medio ambiente y para el proceso de extracción por solvente porque puede afectar al orgánico encargado de captar el ion metal que se trata de extraer.

Los resultados experimentales indican que es posible obtener soluciones de las características deseadas con este procedimiento.

Los experimentos nos señalan que existe una lixiviación selectiva de fases tipo Cu_2S .

La cinética de minerales como Calcopirita (CuFeS_2), Pirita (FeS_2), Enargita (Cu_3AsS_4) atribuible al potencial eléctrico y al Cloruro (Cl^-) y otras especies intermedias como Cloro-Complejo Cúprico se ve interrumpida por la formación de una barrera o capa de azufre elemental que no se oxida.

Lo que no ocurre con minerales de tipo Calcosina (Cu_2S) que producen menos átomos de azufre por iones cúpricos. Esto hace que no se pueda formar una barrera continua.

Esto ocurre por la siguiente reacción:



Esto solo es una Hipótesis del proceso.

Por otro parte los resultados de lixiviados son óptimas para la siguiente etapa de extracción por solvente.

2. UNIDAD DE PROCESOS HIDROMETALURGICOS. (U.P.H)

2.1 Planta de tratamientos de polvos finos:

Los polvos finos capturados en los precipitadores electroestáticos (PPEE) son lixiviados por agitación. Estos polvos provienen de la sub-división Manejo de Gases (MA-GA) de la Fundición, son mezclados en sacos con cementos de cobre, que contienen un 75% de cobre y el resto son impurezas. Estos polvos finos y el cemento de cobre se lixivian y trata en la P.T.P.F. para retener los residuos y así la solución tenga una mayor concentración de cobre. La solución es mezclada en el estanque Cabeza (EST. CBZ-1, fig. 3, pág. 9) con electrolitos que vienen de la división Ventana y Andina de CODELCO y el agua Mina. Luego esta mezcla es enviada a los clarificadores (CLRF-1, CLRF-2) para aumentar su concentración. Los sólidos inertes son separados en los clarificadores usando un floculante (EXPOFLOC) y el PLS clarificado se alimenta a la planta de extracción por solvente.

2.2 Extracción por solvente (SX)

La solución rica (PLS) proveniente de los clarificadores (CLRF-1 y CLRF-2) pasa hacia la planta SX donde se realiza la primera etapa de extracción de Cobre en los estanques mezclador-decantador (E-1 y E-2, fig. 3, pág. 9), con un compuesto orgánico, el orgánico es cargado y almacenado en un estanque de orgánico cargado (ESTQ-1) para ser enviado al proceso de re-extracción (stripping) que ocurre en el estanque mezclador-decantador (S-2), de esta forma el orgánico² baja su concentración en ión cúprico, el que pasa al electrolito pobre (spent). Tal como se muestra en la figura n°2.

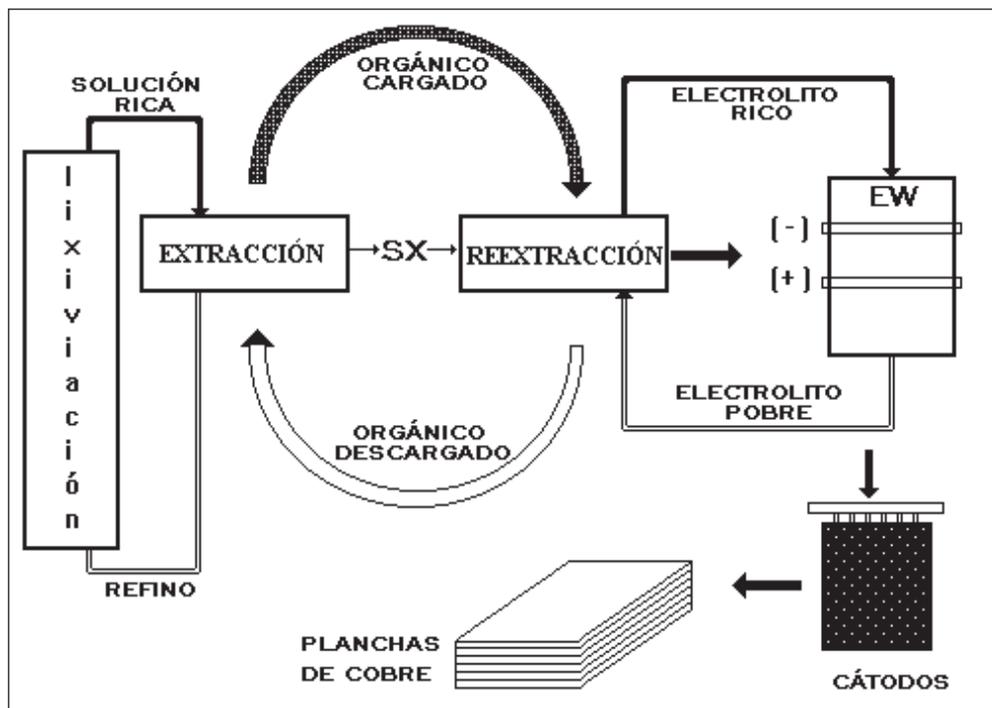


Figura 2. Recuperación de Cobre por extracción por solvente. (SX)

² Orgánico: reactivo químico que tiene un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, formando compuestos orgánico-metálico, y a su vez no tiene afinidad con los otros metales.

2.3 Electro-Obtención

En la planta de electro-obtención (E.W.) se desarrollan las operaciones de producción de cátodos.

La alimentación de PLS viene desde el estanque de electrolito cargado (ESTQ-3) hacia la planta de electro-obtención (E.W.). La corriente principal de electrolito de alta pureza se vierte en los bancos de celdas en serie, donde por un proceso electro-químico ocurre la depositación del ión cúprico sobre los cátodos de partida formando los cátodos de alta pureza.

En forma similar se producen los “cátodos de partida” en bancos disponibles para tal efecto, a la cual llega una corriente menor de electrolito cargado desde el estanque (ESTQ-3)

En el Teniente se generan cátodos de 70 kilos a partir de los cátodos de partida y su producción actual es de 300 ton/mes.

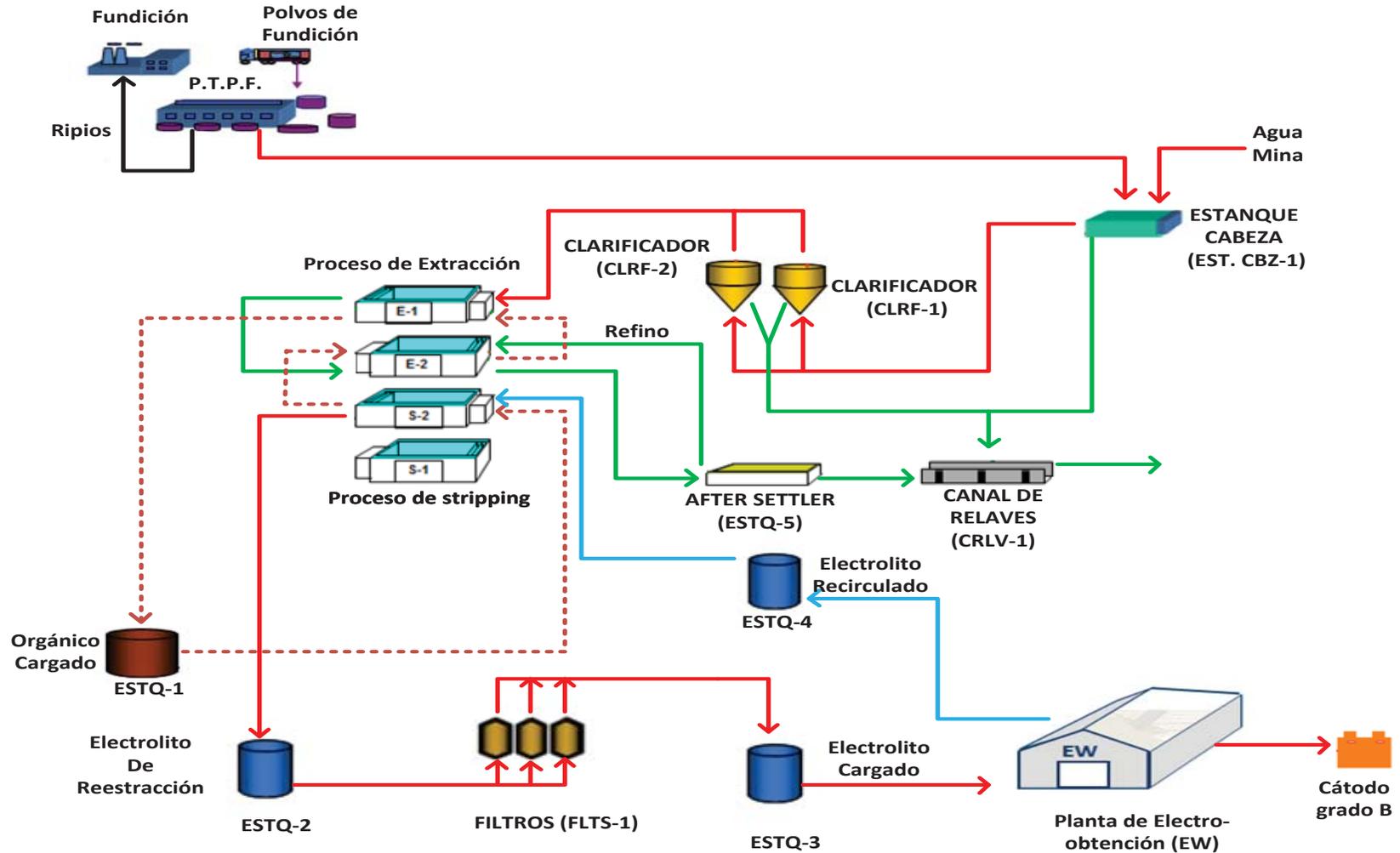


Figura 3. Esquema de la Planta de procesos Hidrometalúrgicos (U.P.H).

3. PLANTA DE TRATAMIENTOS DE POLVOS FINOS

En la planta de Tratamiento de Polvos se desarrollan dos etapas; Lixiviación y Precipitación.

En la primera etapa de lixiviación, se solubiliza una gran parte del Arsénico, secundariamente el Cobre y Hierro soluble. Los ripsos generados son sometidos a una segunda etapa de lixiviación, donde se extrae selectivamente el Bismuto. Los ripsos e impurezas de esta última etapa son enviados a la fundición.

La solución que sale por rebose provenientes del espesador Estándar (ESPDR-1) y el espesador de Bismuto (ESPDR-3) son juntados en el receptor de rebose rico en Cobre (ESTQ-1) para alimentar la etapa de los reactores de Arsénico (RCTR-2 RCTR-3), donde son sometidos a un ajuste de pH entre 2,5 y 3,0 para la oxidación de Hierro y Arsénico, haciendo precipitar compuestos de Arsénico y Bismuto de gran estabilidad, luego son llevados al espesador de precipitados de Arsénico (ESPDR-2) donde el precipitado en el fondo del espesador se envía con una bomba al filtro de placas Perry (FLTR-1), para ser filtrado y la fase sólida resultante es envasada en sacos maxi-bags y confinadas en pozos especiales mientras que las soluciones clarificadas son enviadas a la planta de extracción por solvente (SX) para recuperar el ión Cúprico y después por vía de electro-obtención (EW) obtener el cátodo de Cobre.

3.1 Etapa de Lixiviación Estándar

Los polvos provenientes de los precipitadores electroestáticos (PPEE) (Figura 1, pág. 2) de la fundición son descargados en forma alternada a los reactores de lixiviación estándar (RCTR-1) (Ver fig. N°4, pág. 14) desde la tolva del camión aljibe.

Los polvos descargados en los reactores estándar se mezclan con una solución de refino proveniente del after settler (ESTQ-5, fig.3, pág. 9) y ácido sulfúrico, para formar una pulpa razón sólido líquido 4:1, con concentración de ácido de 30 g/l de la solución.

La pulpa lixiviada es enviada al espesador estándar (ESPDR-1), donde se adiciona floculante³. La descarga por el fondo del espesador con 40% de sólidos es bombeada a un acondicionador (ACDNR-3) para que la solución quede bien mezclada y de esta salen dos flujos uno de recirculación hacia el espesador estándar (ESPDR-1) y el otro flujo se envía a la etapa de lixiviación de Bismuto que por medio de dos reactores (RCTR-4 y RCTR-5) se logra la lixiviación (ANEXO A-4.5, pág. 82). Esta solución lixiviada se envía a un espesador de Bismuto (ESPDR-3) donde la solución de rebose es bombeada al receptor de reboses ricos en Cu^{2+} (ESTQ-1).

3.2 Etapa de lixiviación de Bismuto

La pulpa proveniente del espesador estándar (ESPDR-1) es enviada a los reactores de Bismuto (RCTR-4 y RCTR-5), que operan en serie, donde se mezcla con solución de refino, ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio necesario para formar una pulpa de razón sólido líquido de 1,5:1, conteniendo 40 g/l de ácido Sulfúrico y 150 g/l de cloruro de sodio y la solución queda con $\text{pH} < 1$.

La pulpa lixiviada es alimentada a un estanque espesador (ESPDR-3) de 6 metros de diámetro, en donde se adiciona floculante en una dosificación de 50 [g/t seca de ripio]. La solución de rebose del espesador es bombeada al receptor rico en Cu^{2+} , conjuntamente con la solución de rebose de la lixiviación estándar.

³Floculante: sustancia química comúnmente orgánica que aglutina sólidos en suspensión una vez efectuada su coagulación, provocando su precipitación.

La descarga de fondo del espesador de Bismuto (ESPDR-3) que contiene un 55% de sólidos es bombeada a un espesador de lavado de rípios (ESPDR-4). Donde por contracorriente se lava la solución con refino, además de agregar el floculante en una dosis de 50 [g/ton].

La descarga del espesador de lavado de rípios contiene un mínimo de 60% de sólidos, con alto contenido de cobre, bajos contenidos de Arsénico y Bismuto, es enviada por gravedad a la fundición de Caletones, que es mezclada con los concentrados finales de cobre del concentrador de Colón.

3.3 Etapa de Precipitación de Arsénico

En esta etapa, las soluciones captadas por el receptor de reboses ricos en Cu^{2+} de las etapas de lixiviación estándar (RCTR-1) y lixiviación de Bismuto (RCTR-4 y RCTR-5) se envían a dos reactores en serie (RCTR-2 y RCTR-3), en el que se adiciona una solución de sulfato férrico para suplir la deficiencia de Hierro, y obtener entonces una razón molar Fe/As 4:1, una solución de hidróxido de sodio con una dosificación de 300 g/ton y una solución de peróxido de hidrógeno como agente oxidante, con una dosificación de 1,8 [l/m³], con el objeto de ajustar el pH entre 2,5 y 3,0 y así producir la oxidación del Hierro y Arsénico y formar Arseniato Férrico. (Anexo A-4, pág. 80)

La pulpa proviene de los reactores, es transportada a un estanque espesador (ESPDR-2) que se precipita el Arsénico, adicionando un floculante. La descarga de rebose del espesador es enviada a un pozo rico en Cu^{2+} mientras que el flujo de fondo es enviado a un acondicionador (ACDNR-2) que mezcla la solución y la envía al filtro de placas Perry (FLTR-1) en donde se obtiene una solución clara desarsenificada que es enviada y/o almacenada en el pozo de la solución rica en ion cúprico junto a la solución de rebose del espesador, para posteriormente alimentar la planta de extracción por solventes y recuperar el cobre en solución.

Del filtro prensa (FLTR-1) la torta resultante denominada pulpa residuales es almacenada en sacos maxi-bags para ser vendidas a la empresa Hidronor, la solución rica es enviada al proceso de extracción por solventes y posterior obtención de cátodos de cobre vía electro-obtención.

Finalmente, existe un control de muestreo en diferentes puntos de los procesos, con el fin de analizar, a través de análisis químicos efectuados por la unidad de servicios a procesos y productos SSE, los resultados y variables de operación.

En especial, en la descarga del segundo reactor de precipitación de Arsénico (ESPDR-2) y en los sacos maxi-bags, donde se toma la muestra del compuesto obtenido, para el análisis del test EPA método 1311 TCLP⁴.

⁴test EPA método 1311 TCLP: diseñado para determinar la movilidad de tanto orgánicos como analitos inorgánicos presentes en los residuos líquidos, sólidos y multifásicos.

Capítulo 3 – Planta de Tratamientos de Polvos Finos

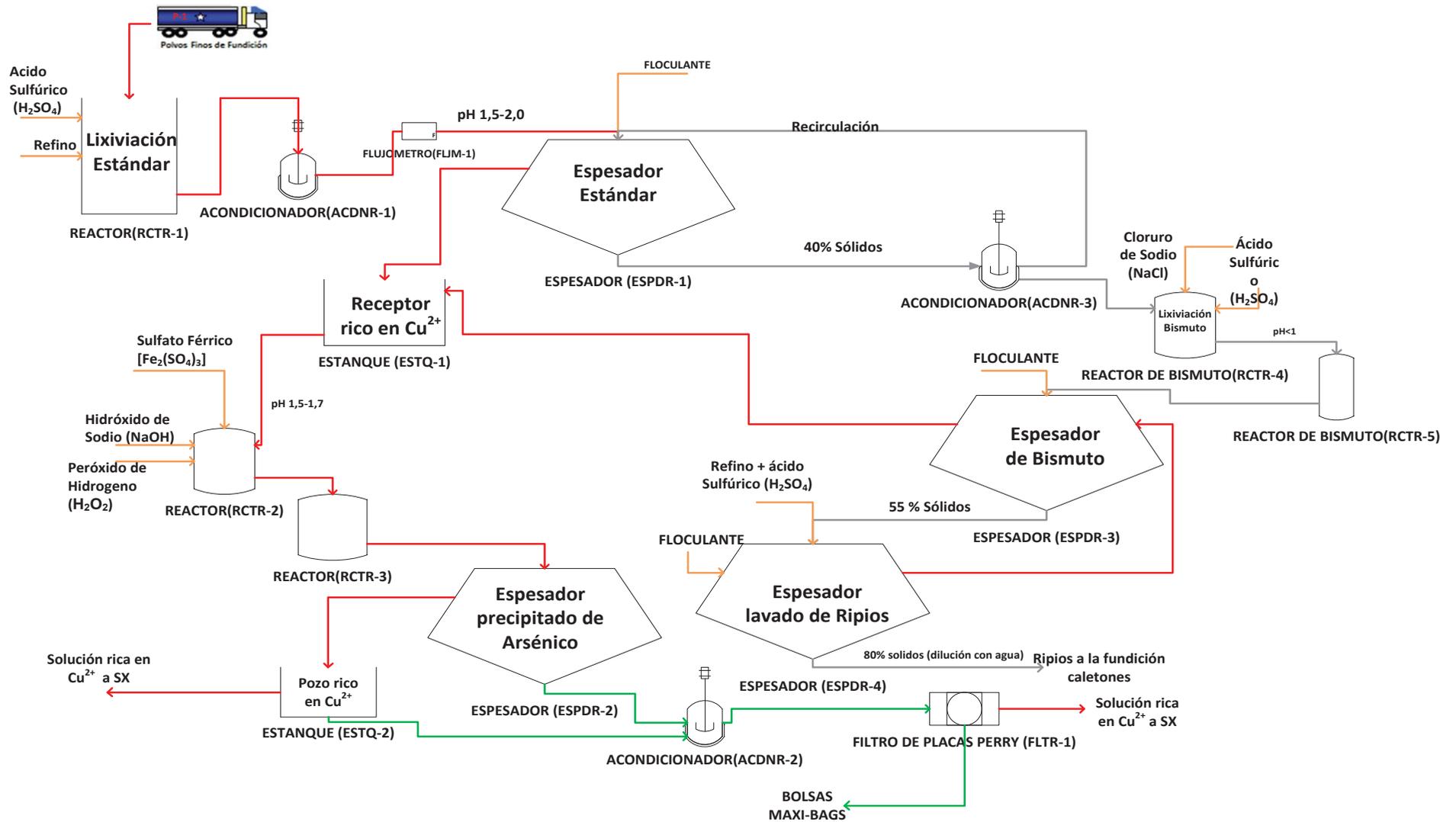


Figura 4. Esquema de la planta de tratamientos de polvos fundición.

4. OBJETIVOS

La Unidad de Procesos Hidrometalurgicos (U.P.H) en los últimos años ha disminuido su producción de cátodos.

Esta tesis tiene como objetivo hacer el estudio de la lixiviación de Sulfuros de Cobre, además de ver un método alternativo de lixiviación, lixiviación en pila, por lo que planteamos los siguientes objetivos:

4.1 Objetivo General.

Lixiviar los sulfuros de Cobre de los polvos que se generan en la Fundición provenientes de las cámaras de enfriamiento, convertidores Teniente y Pierce-Smith, con una solución de ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar cualitativamente (aglomerado, percolación, mineralogía) y cuantitativamente (% de Cobre, Arsénico, disolución másica) los polvos.
- Lixiviar los polvos a distintas concentraciones de Cloruro de Sodio y ácido Sulfúrico, a escala de laboratorio y columnas (simulación de pila lixiviable).
- Evaluar económicamente la propuesta.

Para la realización de los ensayos se hicieron caracterizaciones químicas, mineralógicas y físicas. Ensayos de lixiviación acida con concentraciones de Cloruro de Sodio, para determinar las concentraciones de ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio para la extracción de Cobre.

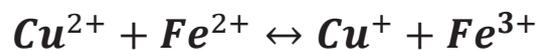
Se realizaron lixiviaciones con distintas concentraciones de:

- a) ácido Sulfúrico
- b) mezclas de ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio.

Estos reactivos se agregaron en el aglomerado y en la solución.

Postulados que se tomaron en cuenta para la memoria.

- La sal tiene efectos significativos en la lixiviación de concentrados, favoreciendo la formación de ácido Clorhídrico, que ataca a los sulfuros de Cobre (1).
- La concentración de Cloruro tiene una función de catalizador para producir Férrico (1).



- La sal ayuda a crear el agente lixivante Cloro-Complejo Cúprico $[\text{CuCl}^+]$ para actuar sobre el sulfuro de cobre (1).

La Hipótesis del proyecto es lixiviar los Sulfuros de Cobre que contienen los polvos generados en la Fundición que provienen de las cámaras de enfriamiento con una solución de ácido sulfúrico y Cloruro de Sodio.

Para esto realizamos un plan de trabajo que consiste en los siguientes puntos:

- Caracterización de los polvos: Química, Mineralógica, Físicas.
- Ensayos: Iso-pH, lixiviación agitada, tasa de irrigación, disolución másica, Aglomerado, lixiviación por irrigación, estimación estequiometrica.
- Montaje de Columnas
- Lixiviación de columnas
- Resultados de extracción
- Factibilidad de la propuesta.

5. CARACTERIZACIÓN DE LOS POLVOS:

5.1 Características químicas.

Se envían mensualmente muestras a la UNIDAD DE CONTROL Y CALIDAD⁵.

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [ppm]	CuNS [%]	S [%]
CT	45	9	3,1	18,7	13,4
CPS	78,4	0,6	0,1	20,8	14

Tabla 1. Promedio de análisis Químicos de polvos meses junio a Octubre.

En los análisis químicos la ley de cobre es más alta en los polvos CPS que los polvos CT, ocurre de forma inversa las concentraciones de Arsénico.

⁵Unidad de control y Calidad: laboratorio ubicado en colon bajo de TENIENTE, donde se realizan las pruebas químicas de la empresa.

5.2 Características mineralógicas.

Especies Mineralógicas	% Peso (Base Sulfuros)	% Peso (Base Mineral)	% Aporte de Cobre (app.)
Fase Celeste	97,89	53,479	99
Fase Amarilla	1,02	0,557	Tr
Cobre Metálico	0,52	0,284	1
Óxidos Verdes	0,57	0,311	Tr
Escoria		45,369	

Tabla 2. Características mineralógicas de los Polvos de CT.

Especies Mineralógicas	% Peso (Base Sulfuros)	% Peso (Base Mineral)	% Aporte de Cobre (app.)
Fase Celeste	79,36	75,474	75
Fase Amarilla	0,09	0,086	Tr
Cobre Metálico	20,51	19,506	25
Óxidos Verdes	0,04	0,038	Tr
Escoria		4,896	

Tabla 3. Características mineralógicas de los Polvos de CPS.

Fase celeste: presenta características de Digenita, Covelina y Calcosita es la que predomina en los polvos

Fase Amarilla: características de la Calcopirita y la tabla indica que esta fase es despreciable, por lo tanto, los polvos no tienen estas características.

Cobre metálico: de los CPS se presenta en un alto porcentaje, esto se debe analizar su impacto en la lixiviación.

Los Óxidos verdes: son despreciables por su cantidad en la mineralogía.

Escoria (magnetita y fayalita), se encuentra mayor cantidad en los Polvos CT.

5.3 Características Físicas

5.3.1 Humedad de los Polvos

Como los Polvos provienen de la fundición y estuvieron expuestos a altas temperaturas para luego ser precipitados en las cámaras de enfriamiento se asumirá una humedad de menor al 0,1% para efecto de los cálculos.

5.3.2 Densidad Aparente

La densidad fue tomada a las mezclas de los polvos CPS y CT por separado.

Densidad aparente CPS`S: 3,176 Ton/m³

Densidad aparente CT`S: 2,208 Ton/m³

5.3.3 Distribución Granulométrica.

Para el análisis granulométrico se pasó el mineral a través de una serie de harneros de Tyler.



Imagen 1. Harnero de Tyler.

Una vez terminada la homogenización del mineral se tomaron todas las muestras necesarias, se determinaron las leyes cabezas de cada uno, donde se midió el %CuT, %FeT, %CuNS, %S, %As. Estos valores fueron la partida para el balance de masa de las pruebas posteriores.

Se tamizo de la malla 10 hasta la -325. Obteniendo así la distribución de las partículas de polvos utilizados, que se muestran en los siguientes gráficos:

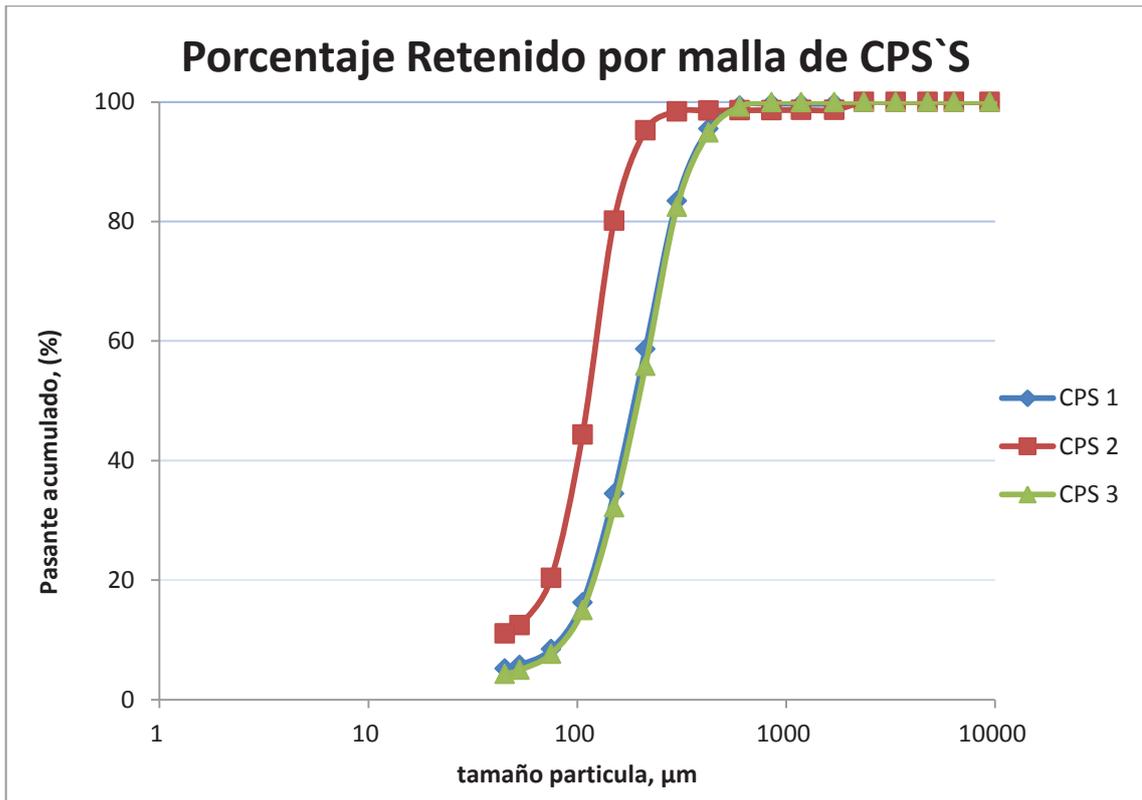


Gráfico 1. Granulometría de polvos CPS.

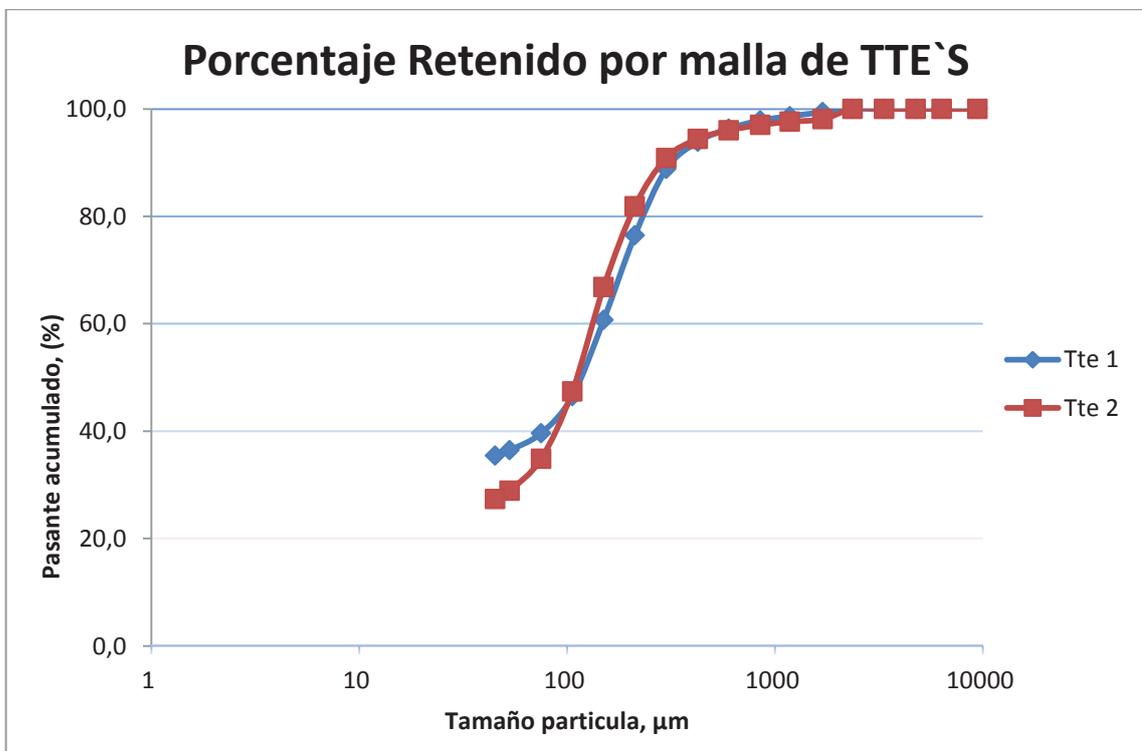


Gráfico 2. Granulometría de polvos TENIENTE.

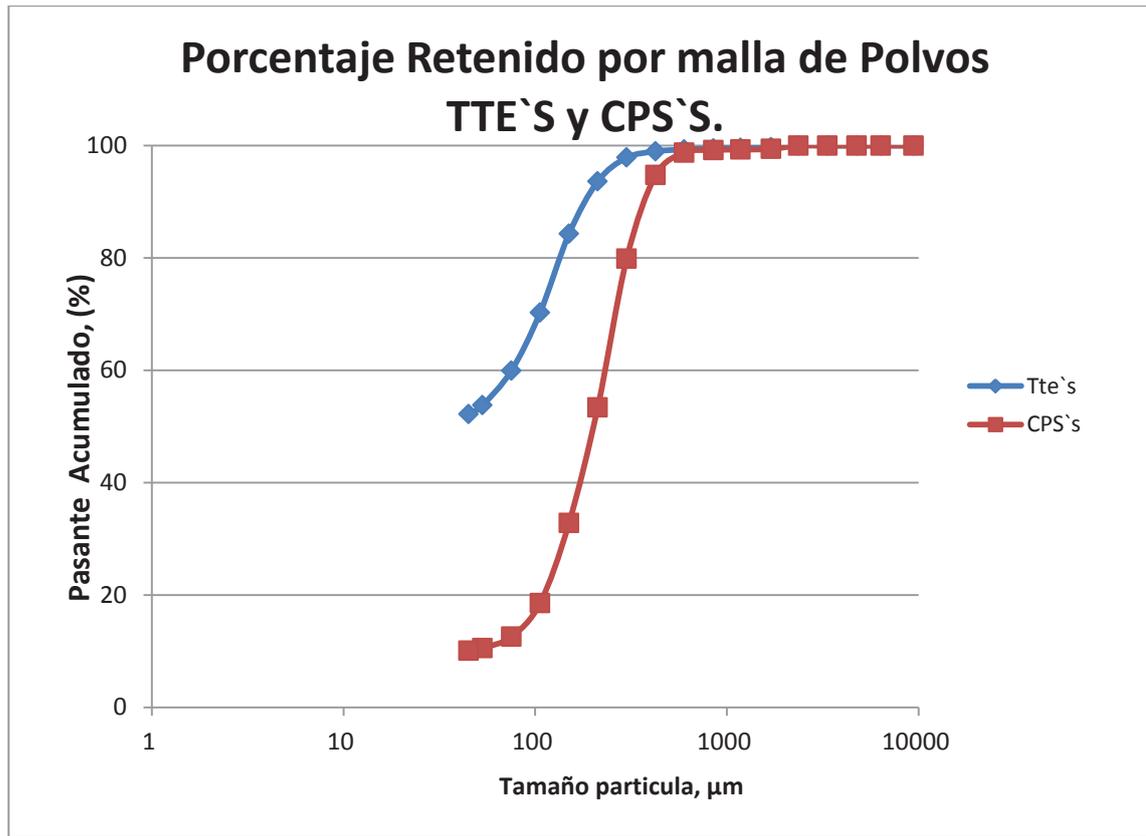


Gráfico 3. Granulometría de mezcla de polvos TTE'S y CPS'S.

5.4 Análisis Granulométrico

En el proceso de lixiviación, es bueno tener un tamaño de partícula bajo, por el hecho de que su lixiviación es más eficiente, en el caso de los polvos la granulometría es bastante buena por lo tanto no es necesario un chancado antes de lixiviar, así se puede enviar directo a la lixiviación y a través de la solución lixivante recuperar la máxima cantidad del metal posible.

6. ENSAYOS

6.1 Ensayo Iso-pH

Objetivo: El consumo de ácido de los Polvos CT y CPS.

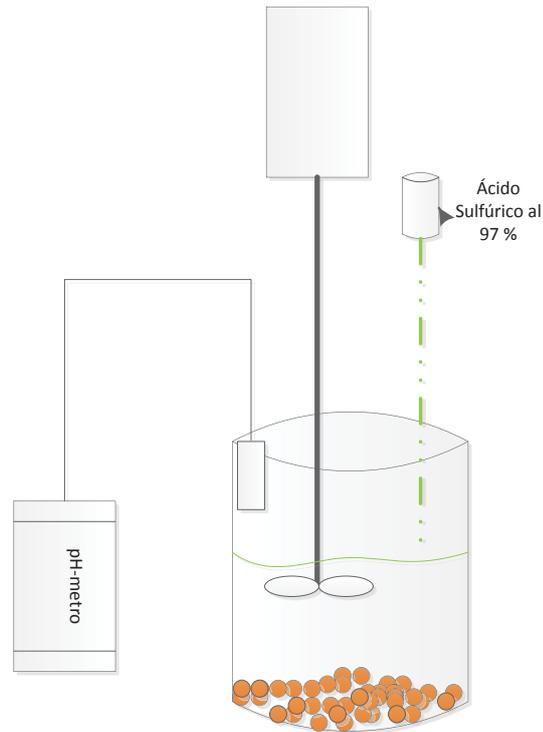


Figura 5. Consumo de ácido:

En un vaso precipitado 1 litro, se agregó 100 gramos de polvos, previamente roleados. Luego se agregaron 1000 [mL.] de refino, se agitó la solución y se dosificó ácido sulfúrico por goteo manteniendo un pH entre 1,7 y 1,8. El pH se debe mantener estable por un tiempo de 15 [min]. La cantidad de ácido que se utilizó, se calculó por diferencia de peso en una balanza eléctrica.

Resultados:

Nombre muestra	Consumo de ácido [L_{H2SO4}/Ton Polvo]
TTE`1	10,4
TTE`2	13,2
CPS`1	34,3
CPS`2	44,7
CPS`3	64,2

Tabla 4. Los consumos de ácido.

Estos resultados no se usaron para los ensayos, porque no se tomó en cuenta la variable del punto de saturación del refino con los polvos. Por lo tanto, se realizó nuevas pruebas tomando la variable, entregando otros resultados (tabla 5).

Nombre muestra	Consumo de ácido [L_{H2SO4}/Ton Polvo]
Tte`s	38,2
CPS`s	71,6

Tabla 5. Consumo de ácido Mezcla de polvos.

6.2 Ensayos de Lixiviación agitada (escala de laboratorio)

Lixiviación.

Es el proceso que se utiliza para la extracción de un metal en su estado de ión a través de un líquido o solvente adecuado. (Anexo A-5, pág. 84).

Las condiciones de lixiviación son:

- Concentración de Cloruro de Sodio $0,1 \frac{Kg NaCl}{Kg de Polvos}$
- Solución lixivante al 10 % de ácido Sulfúrico (97% concentrado).
- Refino tiene un 19,9 PPM de Cu^{++}

Se hicieron 3 ensayos que fueron nombradas Extracción 1 (Ext. 1); Extracción 2 (Ext. 2); Extracción 3 (Ext. 3) para cada condición:

- 1) Extracción de Cobre solo con ácido Sulfúrico, 25[°C], 1 [atm]
- 2) Extracción con ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio, 25 [°C], 1 [atm]

Luego se hizo un promedio de las tres extracciones de cada condición para que sus datos se encuentren lo más preciso posible. Y estos se muestran en los siguientes gráficos.

Recuperación lixiviación agitada

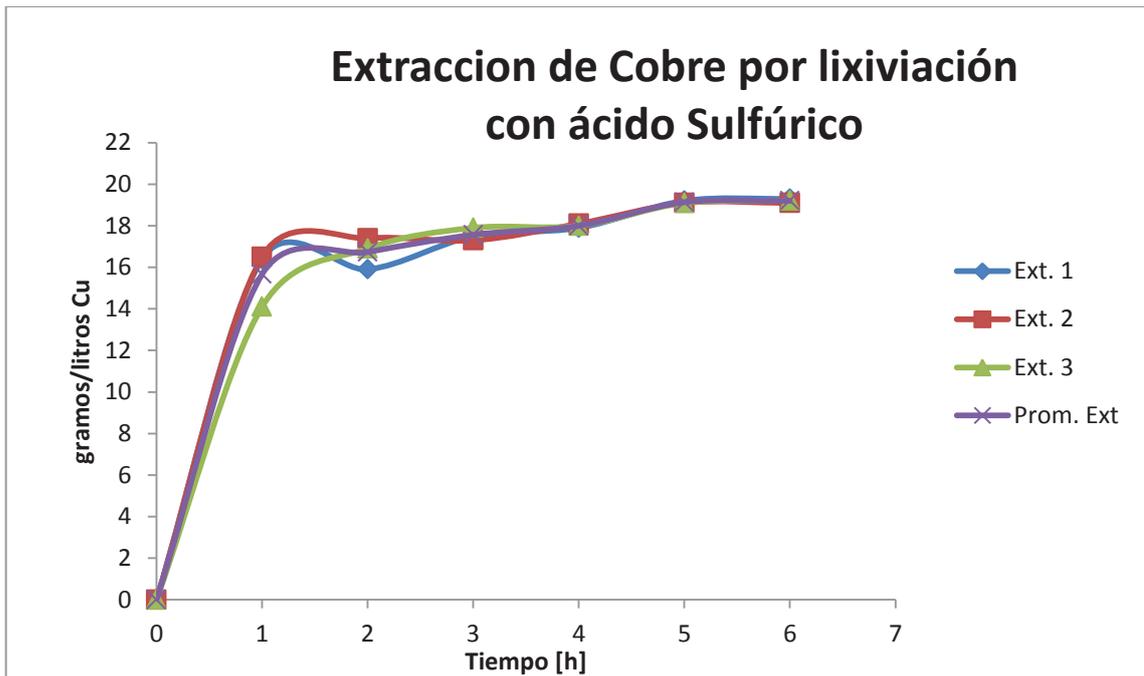


Gráfico 4. Extracción de cobre con ácido sulfúrico por lixiviación agitada a 25 °C y 1 [atm].

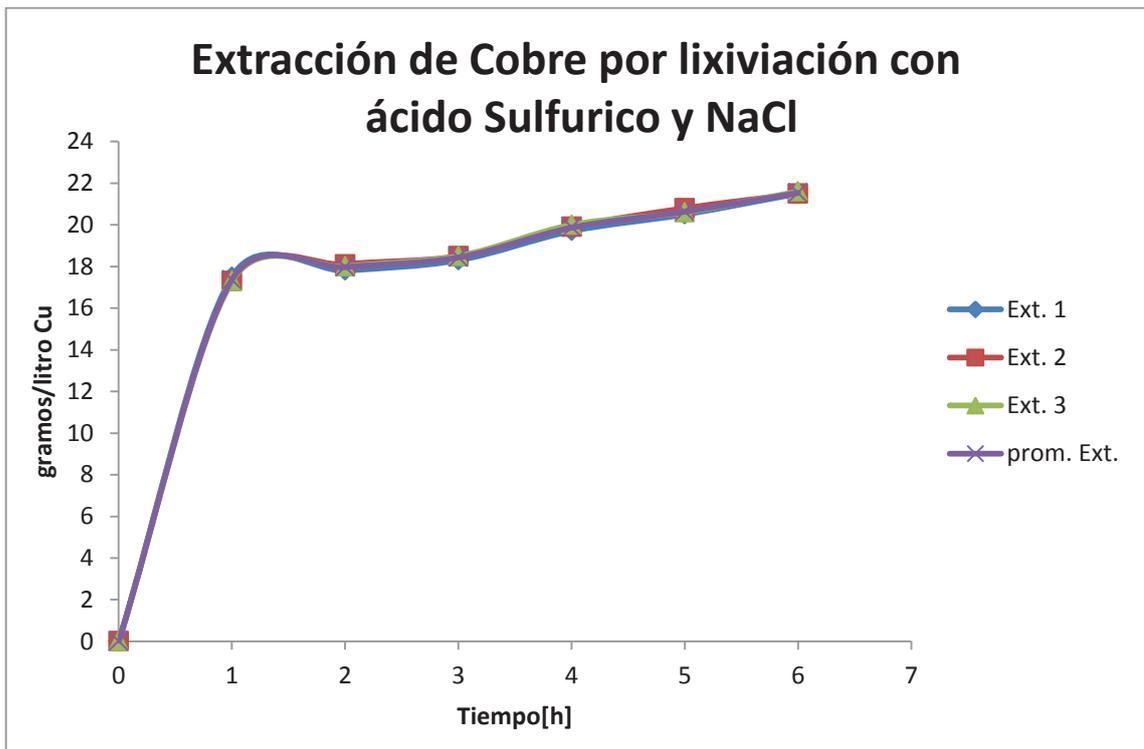


Gráfico 5. Extracción de cobre con ácido sulfúrico y cloruro de sodio por lixiviación agitada a 25°C y 1 [atm].

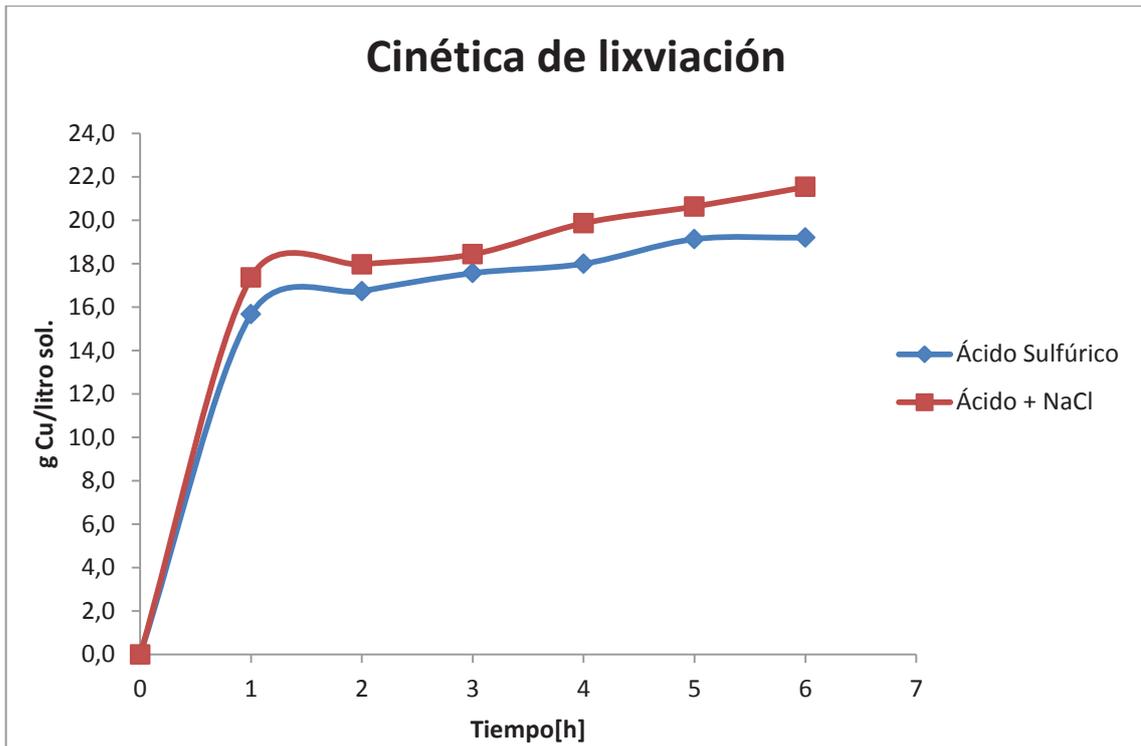


Gráfico 6. Comparación de extracción de Cobre por lixiviación con ácido sulfúrico vs. Ácido sulfúrico y Cloruro de Sodio a 25 °C y 1 [atm].

Con las condiciones indicadas: Concentración de Cloruro de Sodio $0,1 \frac{Kg NaCl}{Kg de Polvos}$, Solución lixiviante al 10 % de ácido Sulfúrico (97% concentrado), Refino tiene un 19,9 PPM de Cu^{++} .

Se generó un aumento del 15% aproximadamente de extracción en la muestra que fue lixiviada con ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio, versus la que solo fue lixiviada con ácido Sulfúrico.

6.3 Ensayos de tasa de irrigación

Los ensayos se realizaron de la siguiente forma:

Se apilo polvo sin aglomerar en filtros de laboratorio acoplados con vasos Erlenmeyer de un litro y medio (1500 c.c.). Luego con una bomba pequeña se empezó a irrigar con una solución (refino) a distintos flujos que se midieron con un cronometro. Los resultados se observan en la tabla 6.

Muestra		Tr[L/m ² *H]
Teniente		7,6
CPS		30,6

Tabla 6. Flujos de irrigación para los polvos Teniente y Pierce-Smith.

6.4 Disolución Másica

Este punto tiene referencia de la masa que se lixivia y la que queda como residuo, al residuo se le tomo un análisis de Arsénico, generando un punto importante en el estudio de la lixiviación.

Muestras			
Teniente	masa inicial(g)	masa final(g)	% disolución
1	100,1	24	76,1
2	100	23,4	76,6
3	100	22,1	77,9

Tabla 7. Disolución másica de los Polvos CT

Muestras			
CPS	masa inicial(g)	masa final(g)	% disolución
1	100	60,1	39,9
2	100	59,3	40,7
3	96,1	58	38,1

Tabla 8. Disolución másica de los Polvos CPS

6.5 Aglomerado

La lixiviación de granulometrías finas y con bajas leyes de Cobre, necesitan un tratamiento más complejo. Para esto existe la aglomeración la que efectúa la adhesión de partículas finas a partículas más grandes para que sus características estructurales sean las más adecuadas para una percolación óptima en la lixiviación. (Anexo A-3, pág. 73)

Se hizo aglomerado a pequeña escala (laboratorio), la que entrego buenos resultados, en las siguientes imágenes se muestran.

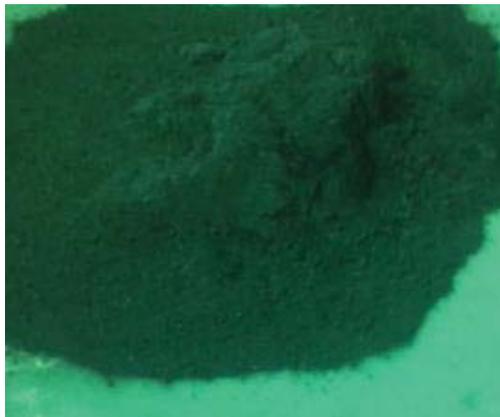


Imagen 2. Polvos Gruesos antes de Aglomeración, día 0.



Imagen 3. Polvos Gruesos aglomerados, día 7.

6.6 Lixiviación por Irrigación

En los ensayos de Irrigación quedo la solución de PLS que se llevaron a procedimiento de laboratorio (Anexo B-1, pág. 94), para obtener su concentración, que se observa en la siguiente tabla.

Nombre Muestra	Cu Solución [g/l]
CPS	37,8
CT	64,6

Tabla 9. Concentración de Cu⁺⁺, para pruebas de lixiviación por irrigación.

6.7 Estimación Estequiometrica



En este sistema de lixiviación podrían disolver especies sulfuradas de Cobre, según estudios a temperatura ambiente, la principal reacción es:



Las estimaciones realizadas nos indican que cada un mol de azufre se necesitan 8 moles de Cloruro (ANEXO B-2, pág. 95) entregando los siguientes resultados

$$1,92 \text{ mol} * 58,44 \frac{g}{mol} = 1122 \frac{Kg \text{ de NaCl}}{Ton \text{ Polvo}}$$

Y como las muestras son de 40 kilos de polvo los resultados son:

$$1122 \frac{Kg \text{ de NaCl}}{Ton \text{ Polvo}} * 1 \frac{ton}{1000Kg} * 40 Kg = 44,88$$

7. COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN

7.1 Montaje de Columnas de un sistema abierto

En el laboratorio de operaciones unitarias (LOU) se hizo el montaje de las columnas como se muestra en la figura 6. En las columnas se mantuvo una irrigación con refino de planta por 20 días, analizando el PLS obtenido diariamente para el balance de masa correspondiente.

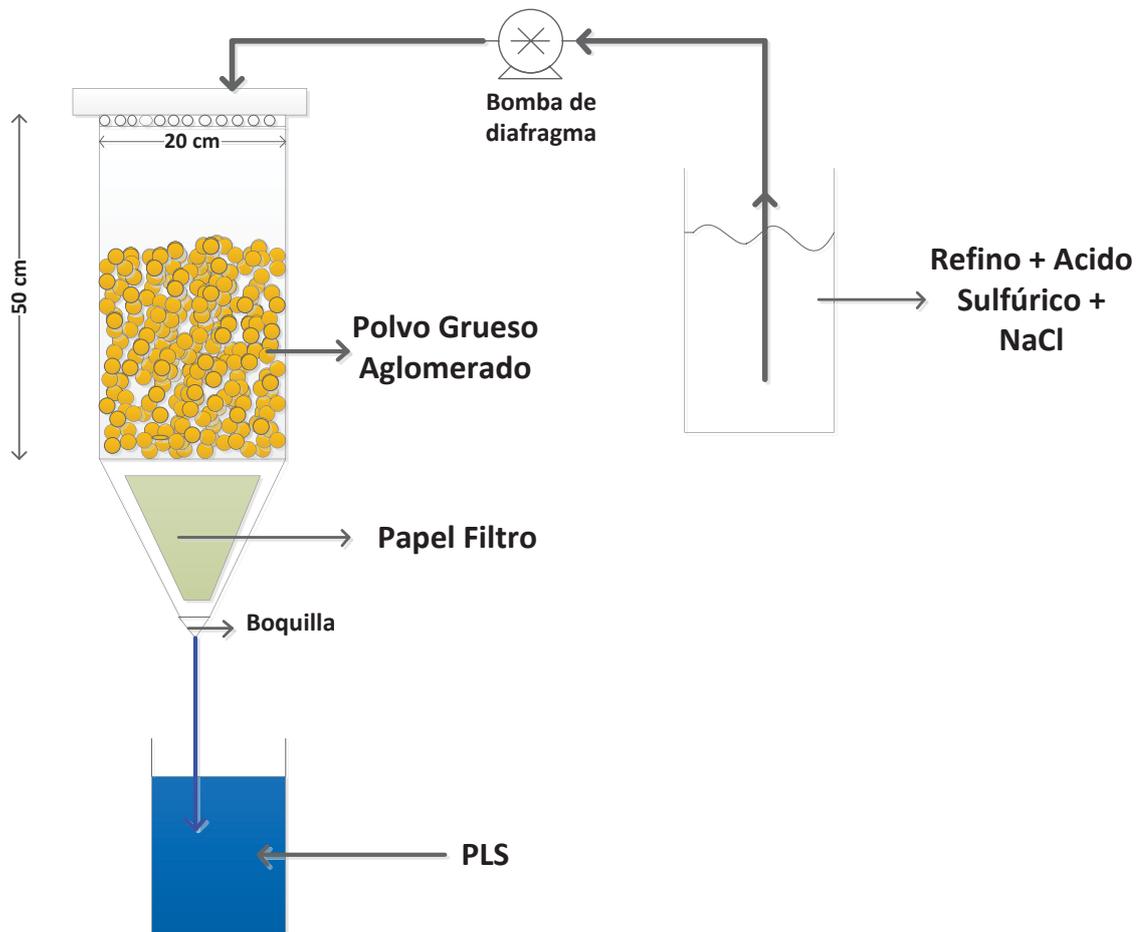


Figura 6. Modelo de Columnas de medio metro de largo y 20 cm de diámetro.

7.2 Resultado del montaje columnas de lixiviación



Imagen 4. Columnas montadas para pruebas de lixiviación a condiciones de 1 atm y 25 [°C]

7.3 Lixiviación en Columnas

Las muestras fueron elegidas aleatoriamente, las cuales antes de ser lixiviadas se homogenizaron por roleo, siendo roleadas de 15 a 20 veces para que sus características sean lo más similar posible, ya que de lo contrario, podemos obtener resultados que no corresponden a la realidad y ver alteradas las conclusiones finales del proyecto.

El material de muestras a utilizar proviene de las cámaras de enfriamiento del Teniente y Pierce-Smith, Fundición Caletones. Este polvo de mineral corresponde tanto a óxidos como a Sulfuros de Cobre, cuya denominación fue de Polvos CT (Convertidor Teniente) y CPS (Convertidor Pierce-Smith) respectivamente.

7.4 Aglomeración de Muestras

Nombre Columna	Aglomerado	Solución Lixivante
Alfa	100 Kg H ₂ SO ₄	Refino
Beta	100 Kg H ₂ SO ₄ + 45 Kg de NaCl	Refino
Gamma	100 Kg H ₂ SO ₄ + 45 Kg de NaCl	Refino + 5 g/l de ácido
Delta	100 Kg H ₂ SO ₄ + 45 Kg de NaCl	Refino + 10 g/l de ácido
Épsilon	100 Kg H ₂ SO ₄	Refino + 15 g/l de ácido y 125 g/l NaCl
Omega	100 Kg H ₂ SO ₄	Refino + 30 g/l de ácido y 250 g/l NaCl

Tabla 10. Concentraciones de ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio en el aglomerado y solución lixivante de los polvos.

Tiempo de reposo (días)

Se aglomero por 20 días las muestras. La humedad del aglomerado debe tener un 10 % (3), y la forma de dosificación del Cloruro de sodio será en estado sólido por las propiedades físico-químicas que tiene el compuesto, además tiene una fácil disolución, no es necesario disolverla en algún líquido.

Tasa de riego 8 [l / (m²*h)]

7.5 Análisis lixiviación columnas

Se montaron seis columnas de medio metro de altura cada una y un diámetro de 20 [cm], llamadas Alfa, Beta, Gamma, Delta, Épsilon, Omega, donde los mejores resultados se obtuvieron en la Épsilon.

El tiempo de aglomerado fue de 20 días empezando el 13 de enero de 2015 hasta el 2 de febrero del 2015 antes de llenar las columnas con los polvos. Se hicieron homogenización todos los días a las 10:00 A.M. por método de roleo (16 roleos a cada muestra para las columnas).

Cada columna tiene una cantidad aproximada de 40 kilos a distintas condiciones de aglomerado, luego los polvos se disolvieron para obtener PLS en su tiempo de lixiviación, que fue de 15 días, desde el 2 de Febrero del 2015 hasta el 18 de Febrero del 2015.

La columna Épsilon corresponde al mejor resultado obtenido durante los tiempos de prueba. (Gráfico 7, página 37)

7.6 Lixiviación Columna Épsilon

La columna Épsilon corresponde a la mejor condición, que contiene 100 Kg de H_2SO_4 /Ton de polvo, y refino con una concentración de 15 g/l H_2SO_4 y 125 g/l de Cloruro de Sodio, una tasa de riego promedio de 8 [l/h*m²] y un consumo total 73,5 litros en 15 días durante un circuito abierto.

Tres flujos con bombas se mantuvieron estables, pero los otros tres flujos que fueron trabajados por gravedad disminuyeron su tasa de irrigación por el hecho de disminuir la altura del estanque en el transcurso del tiempo, por lo que mantenerlo constante fue difícil. Sin embargo el riego de la columna se realizó de una forma homogénea, es decir, los polvos en las columnas fueron mojados con la solución lixivante en toda su área.

7.7 Cinética de lixiviación columnas

Cinética

Este punto es muy importante para el estudio de lixiviación por las velocidades y disolución del Cobre. Es sabido que la cinética de los óxidos es más rápida que la de los sulfuros que tienen una lixiviación más lenta por su estructura refractaria. (ANEXO A-7, página 91)

Al comparar las cinéticas de todas las columnas en el gráfico 7, se puede ver que los resultados obtenidos son los esperados.

La columna Alfa, con las condiciones de aglomerado de 100 kilos de ácido Sulfúrico por tonelada de polvo grueso, lixiviado con refino se obtiene una recuperación de 53,22% correspondiendo al blanco de las pruebas.

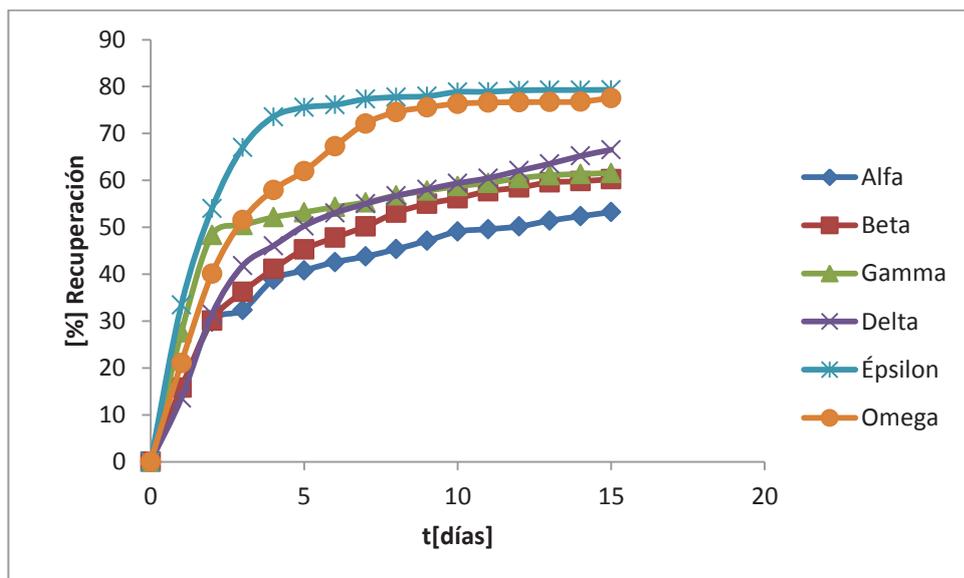


Gráfico 7. % Recuperación de Cobre lixiviación de columnas en un sistema ácido a 25°C y presión atmosférica

La columna Gamma y Delta tienen recuperaciones de 61,57% y 66,53%, lo cual indica que el Cloruro de Sodio (45 Kg de NaCl) en el aglomerado no tiene mayor participación, sino la cantidad de ácido Sulfúrico que se les suministró en el disolvente, la que es de 5 [g/l] de ácido Sulfúrico (H_2SO_4) para la columna Gamma y 10 [g/l] de H_2SO_4 para la columna Delta.

La columna Omega obtuvo excelentes resultados, esta columna contenía polvos del CPS, que tienen un alto porcentaje de cobre que se aprecian en la tabla 1. Esta columna fue lixiviada con una solución de ácido Sulfúrico 30 [g H₂SO₄/l] y 250 g/l de Cloruro de Sodio. La columna Épsilon obtuvo la mayor recuperación de cobre alcanzando un 77,57% luego de 15 días de lixiviación.

Las cinéticas son las esperadas, sin embargo la columna alfa tiene una recuperación pobre en comparación a las demás columnas, esto ocurre por la cantidad de Cloruro de Sodio suministrada a las muestras.

El gráfico 8 muestra el potencial eléctrico, Eh, en función del tiempo de cada columna durante el tiempo de lixiviación de las muestras. Las mediciones se tomaron en el día 0, 5, 10 y 15 de lixiviación.

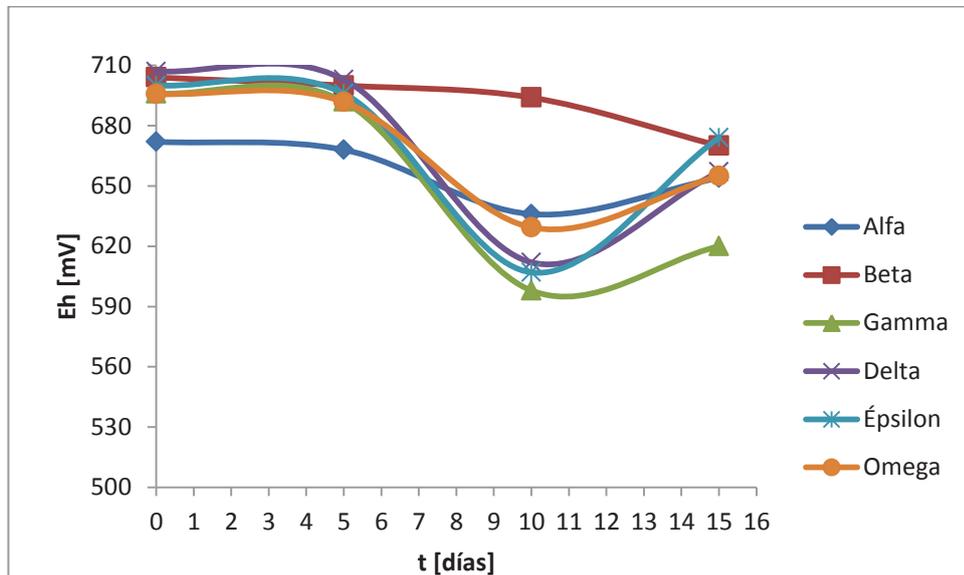


Gráfico 8. Eh [mV]. Lixiviación de columnas, sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

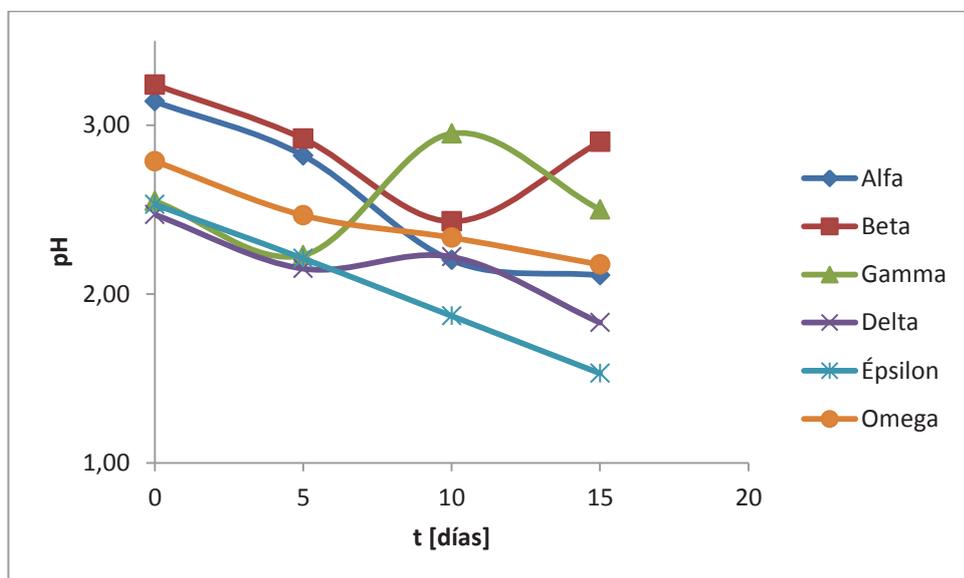


Gráfico 9. pH, lixiviación columnas, sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica

Las columnas poseen bajos valores de pH como se muestra en el gráfico 9 y valores de potencial altos gráfico 8, favoreciendo la extracción de cobre.

8. BALANCE DE MASA

8.1 Capacidad de la planta.

La planta tiene que tener la capacidad de procesar los polvos de Fundición. La producción de estos polvos va ligada con los procesos de fusión-conversión. (Fu-Co)

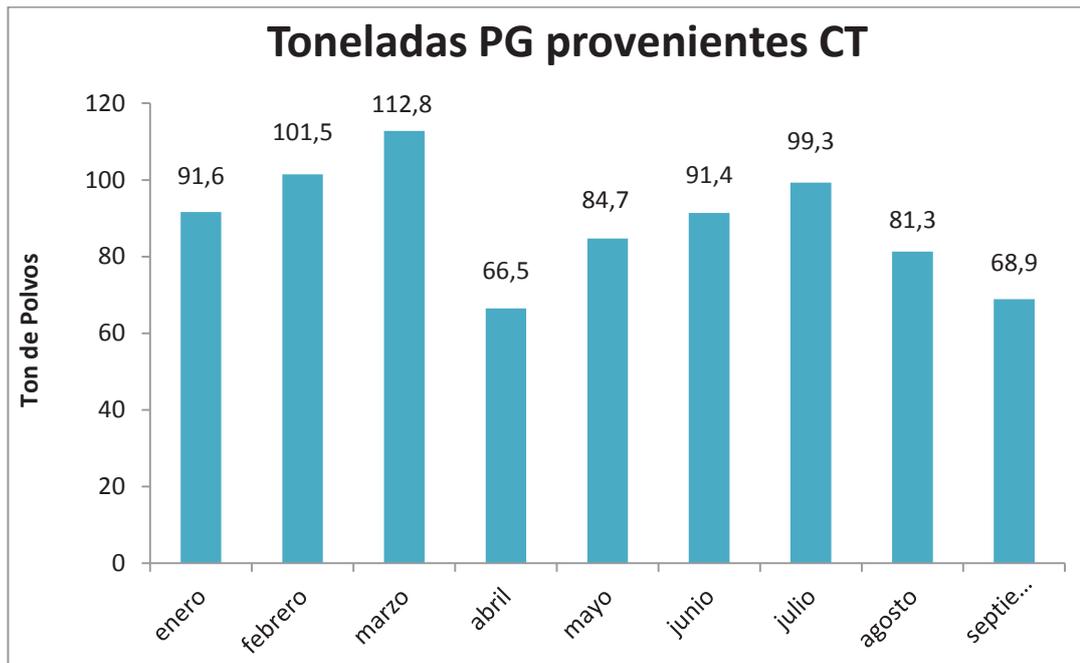


Figura 7. Tonelajes mensuales del Convertidor Teniente

Calculando la media de la tabla en la figura 7 obtenemos 88,7 toneladas mensuales.

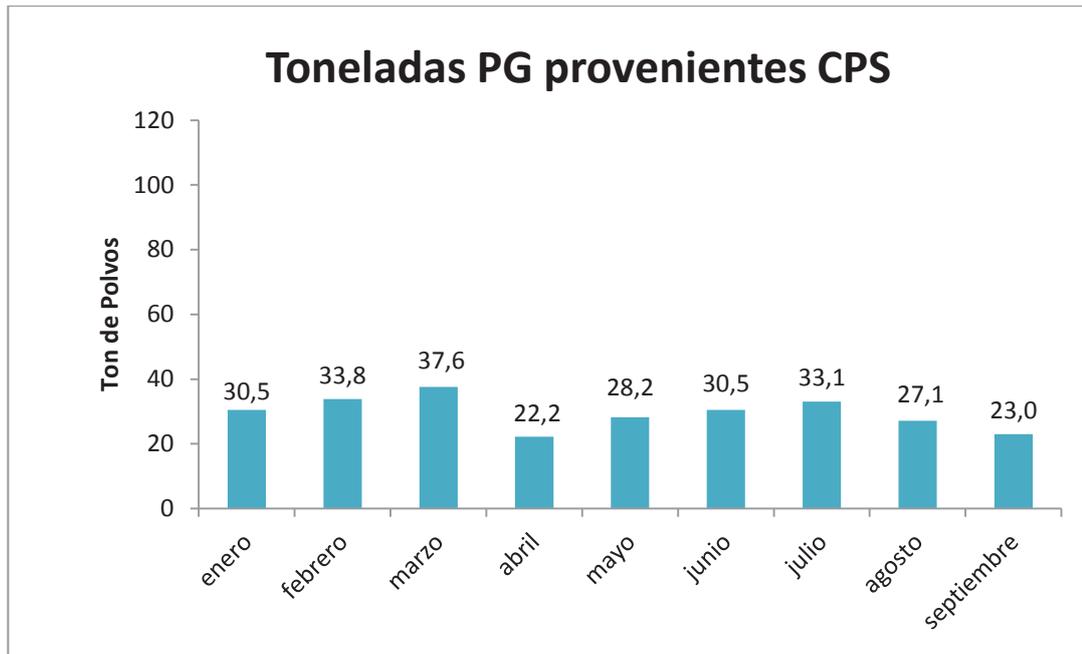


Figura 8. Tonelajes Mensuales del Convertidor Pierce-Smith

Calculando la media de la tabla en la figura 8 obtenemos 29,6 toneladas mensuales.

Por lo que mensualmente se deben tratar 118,3 toneladas aproximadamente. Para el balance mensual de masa en la planta de hidrometalurgia y la extracción de la mejor condición (columna Épsilon). Obtenemos los siguientes resultados.

8.2 Balance de Masa.

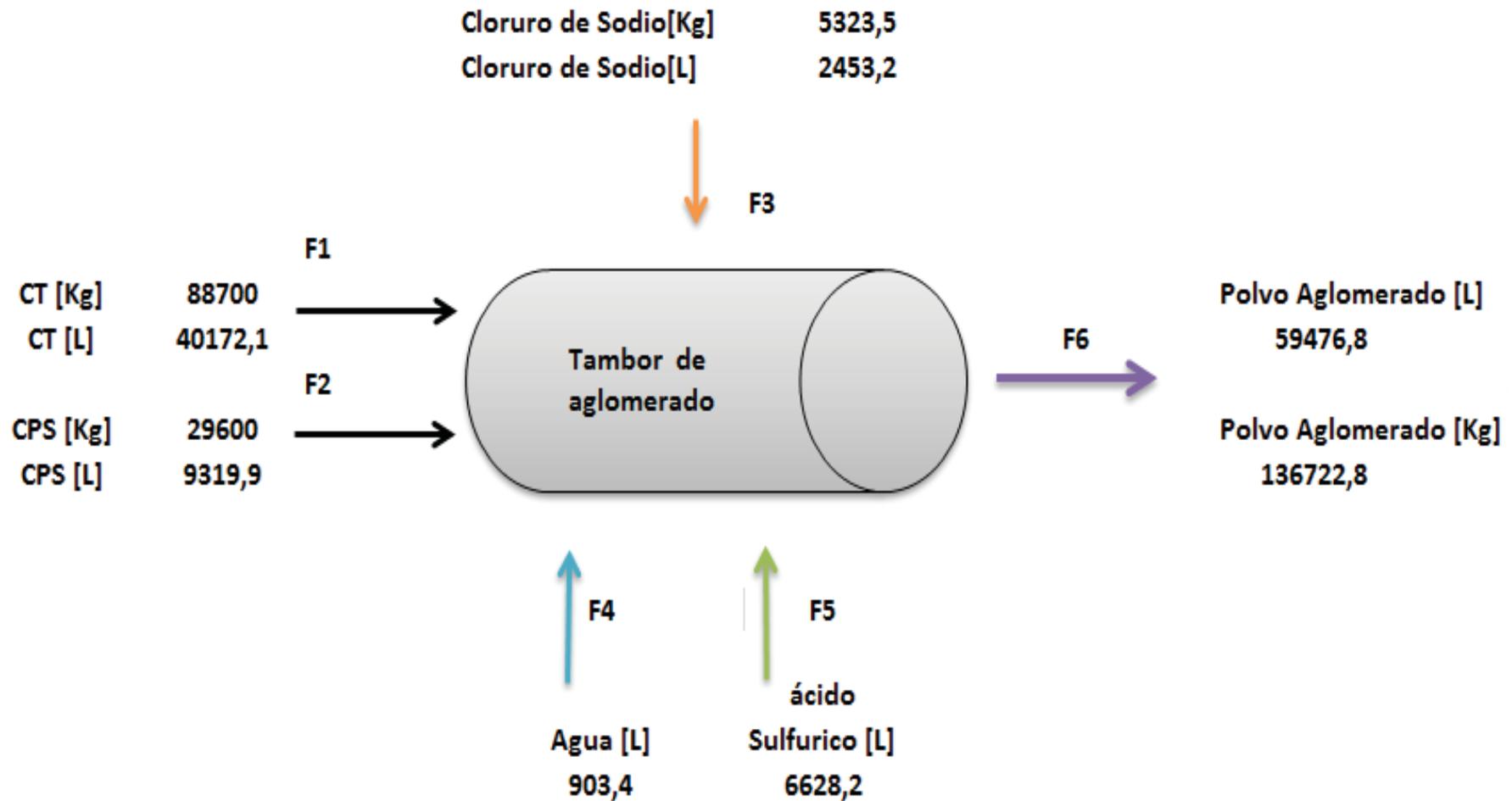


Figura 9. Balance generado hecho para un mes de tratamiento por lixiviación en pila, tambor aglomerador.

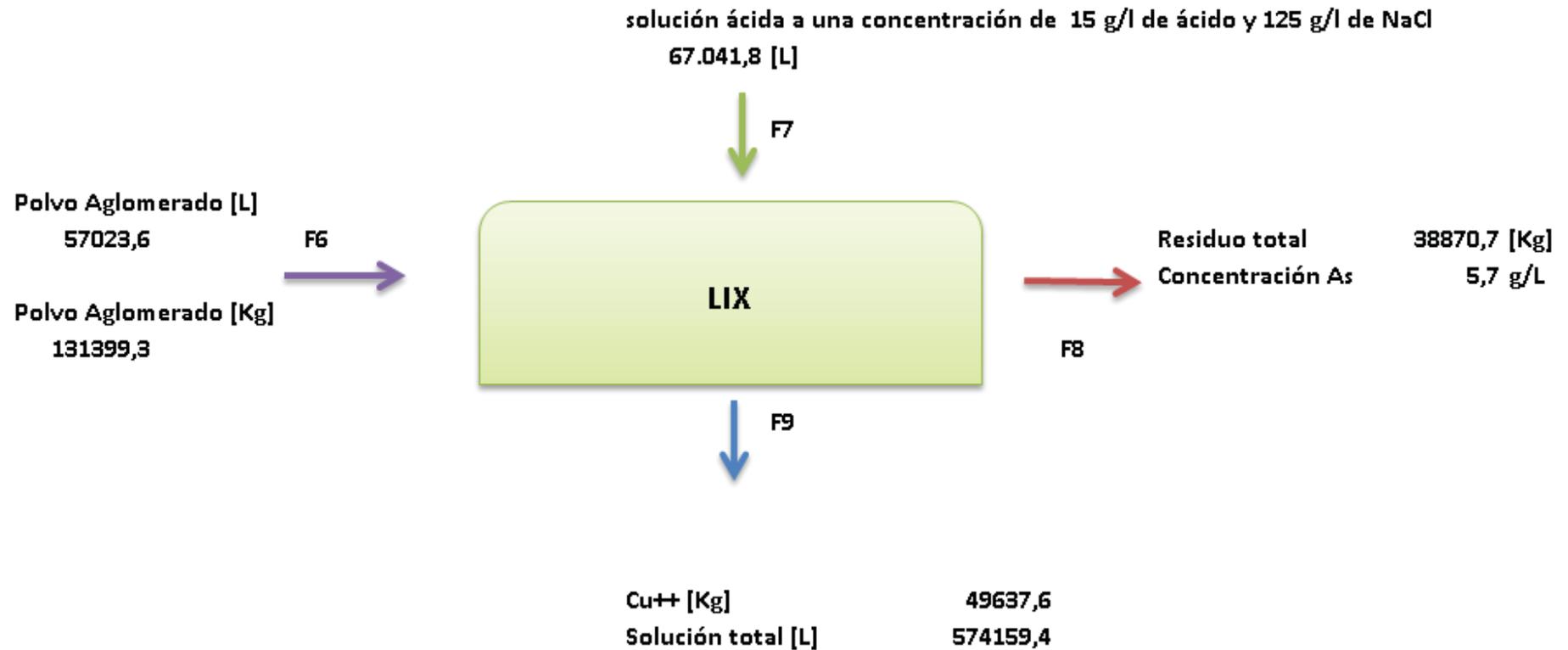


Figura 10. .Balance generado hecho para un mes de tratamiento por lixiviación en pila, pila de lixiviación.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Flujo másico [Kg]	88.700	29600	5323,5	903,4	12195,9	136722,8	481630,8	38870,7	579482,9
Cu Total[Kg]	39.915	23206,4	-	-	-	63121,4	-	13483,8	-
Fe Total[Kg]	7.983	177,6	-	-	-	8160,6	-	753,4	7407,2
CuNS[Kg]	16.586,9	6156,8	-	-	-	22743,7	-	-	-
CuS[Kg]	23.328,1	17049,6	-	-	-	40377,7	-	-	-
S[Kg]	11.885,8	4144	-	-	-	16029,8	-	-	-
As[Kg]	0,275	0,00296	-	-	-	0,3	-	-	637,4
H+[Kg]	-	-	-	-	-	0,0	-	-	3940,5
NaCl[Kg]	-	-	5323,5	-	-	5323,5	54344	-	-
Refino[Kg]	-	-	-	903,4	-	903,4	420765,5	-	-
H2SO4 (96%)[Kg]	-	-	-	-	12195,9	12195,9	6521,3	-	-
Cu++ [Kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	49637,6

Tabla 11 . Balance de masa

Uno de los puntos importantes en el estudio de recuperación de Cobre es el residuo toxico que se genera, en este caso excede el decreto supremo n° 148, el cual habla del manejo de residuos peligrosos (Arsénico). (4)

Según el balance de masa nuestra concentración del residuo es de 5,7 g/l. lo que nos indica que debemos hacer un tratamiento para eliminar el residuo a través de vertederos. (Anexo A-2, pág. 70)

Tomando en cuenta los balances de masa se hizo un diagrama de flujo para dimensionar como quedara hecha la planta.

8.3 Descripción del proceso de lixiviación en Pila propuesto en este trabajo.

El camión de Polvo va directo hacia el tambor aglomerador donde se procesa el polvo para mejorar su condición (aglomerado) para la percolación en las pilas lixiviables. Después con correas transportadoras se envían a la cancha preparada para formar las pilas con ayuda del Bulldozer y comenzar la irrigación en pila.

Luego el PLS se envía al espesador estándar y sigue el proceso para precipitar el Arsénico, Bismuto y la solución quede preparada para la etapa de extracción por solvente y electro-obtención.

Este proceso está descrito en la figura n°11 que se observa a continuación.

8.4 Diagrama de flujo

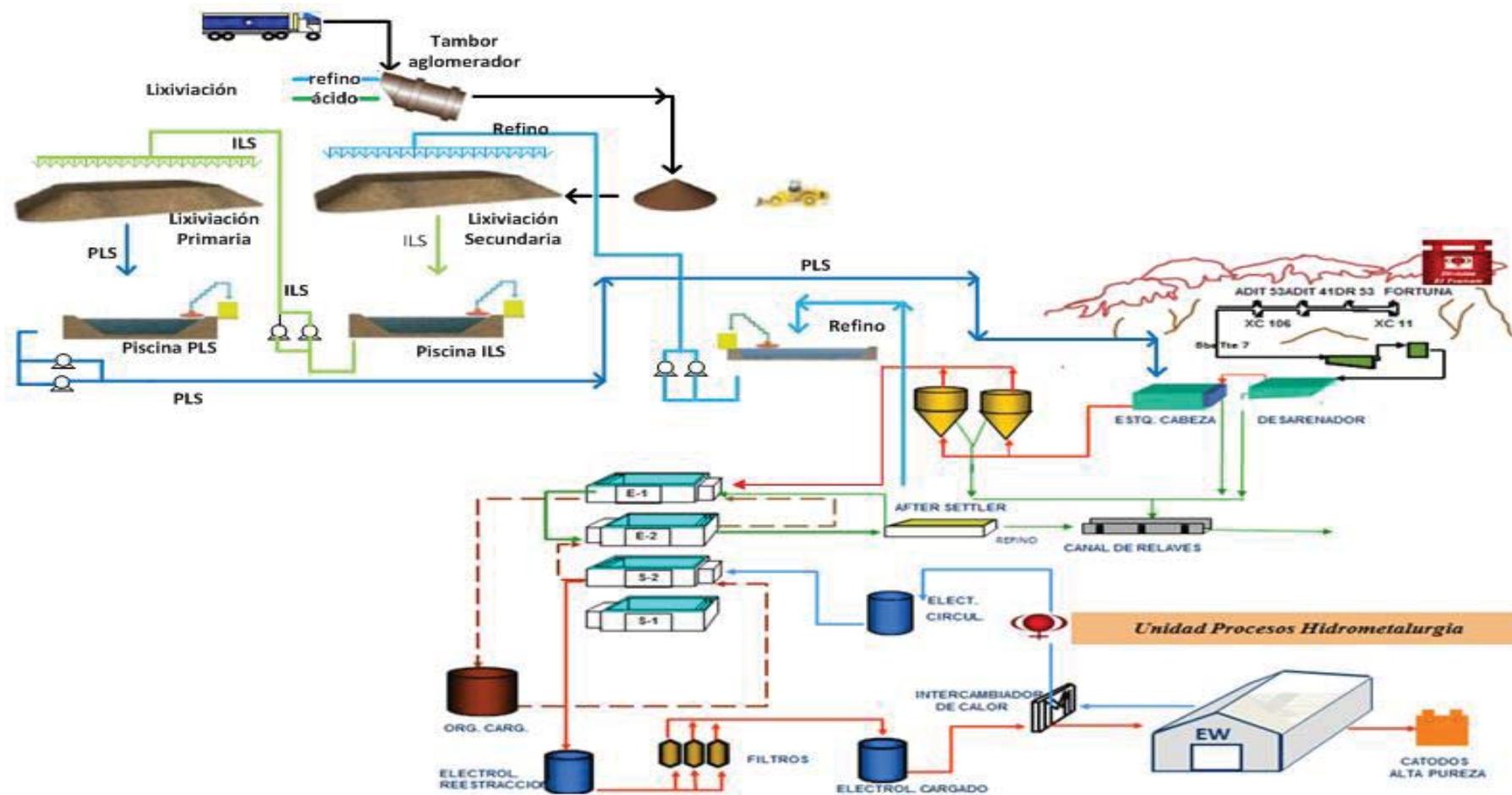


Figura 11. Diagrama de flujo con un sistema de lixiviación en pila propuesto a la U.P.H.

8.5 Descripción de Equipos Requeridos

Camión de Polvos: Camión con capacidad de 10 toneladas adecuado específicamente para almacenar polvos provenientes de la fundición, para el traslado de la Fundición hacia la planta de hidrometalurgia.

Sistema de correas transportadoras: Las correas transportadoras con refuerzo textil (denominadas correas EP) son destinadas principalmente para transportar mineral granel a distancias cortas o medianas (hasta 500 metros), por ejemplo, entre una etapa del proceso a otra dentro de una misma planta procesadora (correas in-plant), o en alimentadores de correas (belt feeders). Los refuerzos textiles se fabrican en su mayoría de polyester-nylon, y permiten resistir tensiones de ruptura hasta 3000kN/m, si bien en la mayoría de las aplicaciones están sometidas a tensiones que no superan los 1000kN/m.

Piscinas: El flujo en el balance es de 580 m³ App. El cálculo se hizo para una piscina que contenga hasta 1000 m³, por algún aumento en la producción. Las dimensiones de la piscina serán de 11 [m] de largo, 11 [m] de ancho y 9 [m] de alto.

Bombas Verticales de tipo turbinas, resistentes a la corrosión. Conforme a las normas ANSI e ISO. Parámetros operativos; Caudal hasta 13.600 m³ /h; alturas de hasta 700 m.; tamaño desde 150 mm. (6 pulg.) Hasta 1375 mm. (54 pulg.). (5)

Bulldozer: Equipo de trabajo de excavación y empuje compuesto por un tractor sobre orugas o sobre dos ejes neumáticos y este ayudar a formar las pilas. (6)

Modelo	Potencia (HP)	Peso de operación (Kg)	Capacidad de Hoja (M3)	Tipo de Hoja	Tipo Ripper	Zapatas (mm)
D39EX-22	95	8.520	2,2	PAT	MS-3D	460

Tambor Aglomerador: Modelo 2100x6200 Heavy Duty

Capacidad nominal de 200 TPH con mineral bajo 1/2". Fabricado en plancha de acero A36, incluye boca de entrada, caja de descarga, puerta de inspección y salida de gases. Sistema de regulación de ángulo de inclinación manual (entre 3° y 9°).

Cilindro inclinado girando a baja velocidad, ocasionando el deslice cascada) y la aglomeración del mineral previamente mojado con agua y/o adherente (Anexo A-3.6, figura 17, pág. 80.).

9. EVALAUCIÓN ECONÓMICA DEL PRODUCTO

En este capítulo se trataron temas económicos del proyecto considerando el valor del producto, costos de inversión, depreciación de los equipos, costos de operación, etc. Estos se desarrollaron con la finalidad de ver bajo que parámetros el negocio de la lixiviación de sulfuros en la planta de hidrometalurgia se vuelve rentable o bajo que situaciones nos conviene realizar el proyecto.

9.1 Valor del producto

El valor del producto, cátodo de cobre, se fija en bolsas de metales, donde la más grande es la Bolsa de Metales de Londres (además de la Nueva York y de Shanghai). Entre otros motivos, esta bolsa se creó para “ordenar” los precios dados los cambios en el mercado de los metales que se produjo con su ingreso masivo tras la conquista de América.

Por operar dentro de un mercado abierto, su precio de venta varía en función de las características de su oferta y de su demanda.

Durante muchas décadas, el precio del cobre se acercó a un dólar la libra. Sin embargo, en los últimos años tuvo un repunte fuera de lo común, llegando a sus mayores niveles (sobre 3 US\$/lb Cu). (7)

Una de sus causas principales en el aumento sistemático de la demanda de cobre de los países asiáticos, donde se destaca China. Esta consume cerca de la quinta parte de la población mundial, ya que es un país con un mercado enorme

Su gran crecimiento económico, niveles de inversión y tamaño de sus mercados, lo han convertido en el principal comprador de cobre a nivel mundial y destino clave de las exportaciones chilenas. (8)

Asimismo, el desarrollo tecnológico de los últimos años ha afectado el aumento de la demanda con el uso masivo de tecnologías información y la comunicación, consumo energético, automatización de procesos y preocupación por el medio ambiente.

También hay situaciones en las cuales las empresas productoras buscan incidir en la alza de los precios, reduciendo la oferta del metal (hay cálculos de expertos

que indican, por ejemplo, que un aumento de un 10% en la producción nacional de cobre genera una baja en el precio de 3,0%).

Incluso los imprevistos como huelgas y accidentes pueden generar caídas en la oferta y aumentos en los precios.

9.2 El cobre y la economía Chilena

El cobre constituye la principal fuente de ingresos por exportaciones de la economía del país (poco más del 40%). Este se comercializa bajo la forma de cátodos y concentrados de cobre, a otros países donde son procesados para producir productos manufacturados. (7)

Por esto, las variaciones del precio del cobre suelen ocupar las primeras planas de los diarios nacionales.

9.3 El aporte de Codelco.

La minería del cobre es desarrollada en forma compartida entre empresas privadas y del estado. CODELCO Chile, la Corporación Nacional del Cobre, es una empresa estatal autónoma, la más grande del país en la minería del cobre y la principal productora de cobre del mundo. (9)

9.4 El precio del cobre y las finanzas públicas

El cobre es tan importante para la economía chilena que su precio estimado se usa como información para la planificación de las finanzas del país.

Una vez al año, los miembros de un grupo de expertos convocados por el Ministerio de Hacienda, definen el precio promedio que estiman tendrá el cobre en los próximos 10 años.

El Gobierno elimina las alternativas con el precio más alto y el más bajo, para sacar un promedio con los valores de los restantes. Con esa cifra, calcula el balance estructural de la economía.

Este valor también se utiliza para el funcionamiento del Fondo de Compensación de Precios del Cobre.

Si el valor real es 4 centavos mayor que el estimado por el fondo, este no opera. Si es 10 centavos mayor, de los 6 centavos restantes, la mitad se va al

fondo y el resto a gasto. Si el precio es sobre 10 centavos respecto al fijado en el Presupuesto, el 100%, se destina al fondo. (9)

9.5 Costo de equipos.

Para realizar la determinación del capital total de inversión necesario para construir la planta se consideran las relaciones propuestas por el libro Peter y Timmershaus (10), el cual desarrolla estimaciones de la inversión en base al costo de los equipos en planta. Es por este motivo que primero se realizó un estudio de los precios para los equipos, dentro de estos se encuentra PONER LAS MAQUINAS PARA EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN, fueron estimados para el año 2002 según las tablas propuestas en el mismo libro. Sus valores para la fecha fueron obtenidos gracias a la relación de Marshall. Según estas máquinas se usó su costo CIF. Que se obtiene en la siguiente tabla

Costo Equipos			
Equipo	Cantidad	Valor Total FOB	Valor Total CIF
Camión 3/4 (10 toneladas)	1	25.000.000	48219,6
correas transportadoras	1	-	17880,6
piscinas	2	11.886.694	22926,9
Bombas	8	9.457.402	18241,3
Bulldozer	1	-	324925,8
tambor aglomerador	1	-	24703,3
COSTO TOTAL CIF			456897,5

Tabla 12. Costos de equipos con sus valores CIF.

Los valores entregados por la tabla están en dólares E.E.U.U.

Obteniendo el costo CIF de cada uno de los equipos se estimó cuánto costaría la instalación en planta de cada uno de ellos el cual se ve en la tabla cada uno esta evaluado en el porcentaje del costo del equipo.

Costo Instalación Equipos		
Equipos	%	Costo instalación
Bombas	20	3.648
correas transportadoras	30	5.364
piscinas	30	6.878
Tambor aglomerador	65	16.057
Bulldozer	20	64.985
Costo total instalación		96.933

Tabla 13. Costo instalación de equipos.

Luego para calcular el costo de capital total de inversión se consideró el costo de la instalación de los equipos, y en las consideraciones de los porcentajes para estimar el valor, no se consideró el costo de servicios debido a que la planta es. Además dentro de las relaciones se utilizara el costo total de instalación calculado en la tabla anterior, con lo que se puede obtener el costo de capital directo en la siguiente tabla y el costo de capital indirecto en la tabla que sigue y a partir de estas tablas estimar el costo de capital inversión en la siguiente tabla.

Total Capital de Inversión		
Costos directos	% costo equipos	Datos Estimados
Costo equipos entregados	100	456.897
Instalación equipos	-	96.933
instrumentación y controles instalado	3	13.707
Cañerías instaladas	10	45.690
sistema eléctrico	10	45.690
Edificación	29	
Mejoras de terreno	4	18.276
Total capital fijo directo		677.193

Tabla 14. Total de Capital de Inversión

Costos indirectos	% costo equipos	Valor
Ingeniería y supervisión	10	45.690
gasto de construcción	8	36.552
gastos Legales	1	4.569
impuestos de contrato	1	4.569
contingencias	5	22.845
Total costos indirectos planta		114.224

Tabla 15. Costos Indirectos

Capital fijo de inversión		791.417
Capital de trabajo	15% TCI	139.662
TOTAL CAPITAL INVERSION (TCI)		931.079

Tabla 16. Total Capital de Inversión

9.6 Costo de operación

En esta sección se cotizaran las variables y materias primas necesarias para obtener como producto el cátodo de cobre al final del sistema. Este valor será de utilidad ya que permitirá calcular el valor de utilidad neta.

9.7 Consumos energéticos

Para calcular el costo de mantener en funcionamiento los equipos en la planta se utilizó el precio de Chilectra para empresas el cual entra en la categoría BT4,3 el cual toma el valor de 106,65 \$/kWh. Resumiendo los consumos tenemos que:

Equipo	cantidad	Potencia equipos por año [kWh]	Potencia equipos por año [kWh]	Costo energético [\$ dólar/año]
Tambor aglomerador	1	70,84	620.558,4	98.193,7
Correas Transportadoras	1	3,7	31.968	5.058
Bomba	6	13,5	126.360	19.994,5
Gasto energético Total				123.247

Tabla 17. Consumos energéticos del sistema de lixiviación.

9.8 Consumos de Cloruro de Sodio

El costo asociado al reactivo es de un valor de NaCl 679 CLP/Kg

La planta procesaría 8380,23 Kg de Cloruro de Sodio mensual al proceso, obtenemos:

$$8380,23 \frac{Kg \ NaCl}{mensual} * 679 \frac{pesos}{Kg} * 12 \frac{meses}{año} * \frac{\$dolar}{674 \ pesos} = 101.308,8 \frac{\$ \ dolar}{año}$$

Actualmente la planta Hidrometalurgia, tiene una producción anual de Cobre de 3156 toneladas al año en forma de cátodo esto equivale a la suma de los óxidos de Cobre en el polvo fino, cemento de cobre, electrolitos y agua mina como materia prima.

Haciendo la comparación de cuanta es la recuperación anual de Cobre por los polvos finos solamente el resultado sería el siguiente.

Con un promedio de 1200 kilos de polvos finos diarios a la planta de hidrometalurgia, con una ley cabeza de 45% (CuT) y 18,7 (CuNS) y una recuperación en la lixiviación agitada de un 98%. El Cobre recuperado por los polvos finos es de:

$$1200 \frac{Kg \ Polvos \ finos}{dia} * 0,45 * 0,187 * 0,98 * 365 \frac{dias}{año} = 36120,55 \ Kg \ de \ Cobre$$

Eso es equivalente a 36,1 Toneladas de Cobre anual por lo que las 3120 toneladas restantes son recuperadas por el agua mina, electrolitos de Ventana y Andina (divisiones de CODELCO) y el cemento de Cobre.

El precio del cobre 237,73 Centavos la libra de cobre por lo que la utilidad de venta será. Con la lixiviación de Sulfuros en los polvos gruesos, se generará un aumento de 49,64 toneladas de Cobre mensual. Esto nos lleva al siguiente cálculo:

$$237,73 \frac{¢}{lb \ Cu} * 2,2 \frac{lb}{Kg} * 6,159 \frac{CLP}{¢} * 49,64 \frac{ton}{mensual} * 1000 \frac{Kg}{tn} * \frac{\$ \ dolar}{674 \ CLP} * 12 \frac{meses}{año}$$

Dando un resultado $2.846.885,5 \frac{\$}{\text{año}}$ en ventas.

Haciendo el balance a un año normal:

	\$	%
Ventas	2.846.885,5	100
Costos de bienes Tangibles y Servicios	-	-
Costos Nacionales	239.138,4	8,4
Costos Internacionales	42.703,3	1,5
Subtotal	281.841,7	9,9
Valor agregado generado	2.565.043,8	90,1
Empleados	179.353,8	6,3
Contratistas	256.219,7	9
Estado	466.889,2	16,4
Propietarios	0,0	0
Comunidad y Medio Ambiente	11.387,5	0,4
Retenido en la empresa	1.933.035,2	67,9
Financistas	0,0	0
Valor agregado Distribuido	2.565.043,8	100

Por lo que los gastos operacionales que se comprenden como las ventas menos lo retenido por la empresa tienen un valor de 913.850,2 dólar/año

La aplicación de Cloruro de Sodio, generara un aumento del 1,5% en la producción y además aumenta su cinética en la producción de ion cúprico

Por lo tanto actualmente el proceso de lixiviación tiene un costo de:

$$C_{opActual} \frac{4.841.712,6 \frac{\$}{\text{año}}}{3.156 \frac{\text{ton Cu}}{\text{año}}} = 1.534,13 \frac{\$}{\text{ton Cu}}$$

Si implementamos un sistema de lixiviación en pila para los polvos, que provienen de las cámaras de enfriamiento, la producción anual de Cobre será aproximadamente de 49,62 toneladas más el gasto del reactivo. Esto generara un costo de operación que es el siguiente:

$$C_{opNuevo} \frac{68.180,5 + 101.308,8 \frac{\$}{\text{año}} + 4.841.712,6 \frac{\$}{\text{año}}}{3205,6 \frac{\text{ton}}{\text{año}}} = 1.563,3 \frac{\$}{\text{ton}}$$

Por lo tanto mediante el uso de este reactivo que aumenta la cinética se obtiene un aumento en el costo de producción y aumento de la producción.

Lo que es bueno para la empresa, además de eso, se procedió a hacer una caja de flujo neto donde están los costos asociados de inversión, ventas, producción costos de operación, etc. Para ver si el proyecto es viable.

Capítulo 9 –Evaluación Financiera

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingreso por venta		2.846.885	2.846.885	2.846.885	2.846.885	2.846.885
Gasto operacional		1.206.586	1.206.586	1.206.586	1.206.586	1.206.586
Utilidad operacional		1.640.299	1.640.299	1.640.299	1.640.299	1.640.299
Depreciación		41.121	41.121	41.121	41.121	41.121
Venta activo						
interés		0	50.278	44.692	39.105	33.519
Utilidad antes del impuesto		1.599.178	1.548.900	1.554.487	1.560.073	1.565.660
Impuesto		271.860	263.313	264.263	265.212	266.162
Utilidad después del impuesto		1.327.318	1.285.587	1.290.224	1.294.861	1.299.498
Depreciación		41.121	41.121	41.121	41.121	41.121
Valor de salvamento						
Amortización		55.865	55.865	55.865	55.865	55.865
Préstamo	558.647					
Inversión	931.079					
Flujo de Caja neto	-372.431	1.312.574	1.270.843	1.275.480	1.280.117	1.284.754
Valor presente	-372.431	1.193.249	1.050.284	958.287	874.337	797.731

Capítulo 9 –Evaluación Financiera

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Ingreso por venta	2.846.885	2.846.885	2.846.885	2.846.885	2.846.885
Gasto operacional	1.206.586	1.206.586	1.206.586	1.206.586	1.206.586
Utilidad operacional	1.640.299	1.640.299	1.640.299	1.640.299	1.640.299
Depreciación	41.121	41.121	41.121	41.121	41.121
Venta activo					0
interés	27.932	22.346	16.759	11.173	5.586
Utilidad antes del impuesto	1.571.246	1.576.833	1.582.419	1.588.006	1.593.592
Impuesto	267.112	268.062	269.011	269.961	270.911
Utilidad después del impuesto	1.304.134	1.308.771	1.313.408	1.318.045	1.322.682
Depreciación	41.121	41.121	41.121	41.121	41.121
Valor de salvamento					137.069
Amortización	55.865	55.865	55.865	55.865	55.865
Préstamo					
Inversión					
Flujo de Caja neto	1.289.390	1.294.027	1.298.664	1.303.301	1.445.007
Valor presente	727.827	664.041	605.836	552.727	557.113

TMAR	0,1
VAN	7.609.000

Aplicando una tasa máxima activa de retorno (TMAR) de 10% que es un valor conservador, el proyecto de una planta de lixiviación en pila es rentable

10. CONCLUSIONES

Los resultados de las columnas nos dejan en evidencia que el Cloruro de Sodio tiene influencia positiva en la lixiviación de los polvos que se generan en Fundición, obteniendo mejores recuperaciones de cobre.

Se observó que es más efectivo el reactivo en la solución que en la aglomeración, porque en este último, no causa gran efecto en las oxidaciones del Cobre.

Un sistema de lixiviación por pila es rentable, pero el bajo tonelaje con el que se trabaja en la planta, no genera una opción para su implementación.

Se deja la opción de trabajar con los polvos por lixiviación agitada, tomando en cuenta variables de Concentración de Arsénico, Cloruro y otras impurezas que puedan afectar el procesos de extracción por solvente y/o problemas de operación en los estanques mezclador-decantador de la planta de Hidrometalurgia.

10.1 Análisis entre columnas

La columna Épsilon obtuvo una recuperación de Cobre del 79,32%, muy superior a las otras recuperaciones que se obtuvieron en la lixiviación en las columnas del laboratorio de operaciones unitarias, que varían de una recuperación entre el 40% y el 65% dependiendo del polvo (CT'S, CPS'S).

Otro factor importante es el tiempo de aglomerado el que fue de 20 días y de lixiviación 15 días, el que afecto en la recuperación o cinética de las columnas.

Al realizar el balance de masa a la columna Épsilon, obtuvo casi un 100% de lixiviación en los Óxidos y un 70% en el mineral sulfurado.

10.2 Recomendaciones

Tal como se esperaba y se comprobó durante el desarrollo de la Tesis, el trabajo dio excelentes resultados en la lixiviación de polvos sulfurados, aunque se haya trabajado a temperatura ambiente, sin embargo las recuperaciones no son sobre el 90% como en estudios bibliográficos se destacan, esto se diferencia por las condiciones en que se realizan las pruebas, temperatura, agitación, presión, etc.

Se debe seguir investigando la manera de recuperar estos polvos en la planta, ya que es un plus en la minería de TENIENTE, como recomendación general se deja al estudio la lixiviación con Sulfato Férrico para aumentar la extracción y además el estudio del efecto de estos reactivos en el orgánico del proceso de extracción por solvente.

11. BIBLIOGRAFÍA

1. *Lixiviación de Concentrados de Cobre utilizando NaCl y el Cobre soluble aportado por el propio concentrado.* **O. Herreros, N. Bernal, R. Quiroz, G. Fuentes y J. Viñals.** 384-392, Madrid : Revista de Metalurgia, 2005.
2. *Lixiviación de concentrados de cobre con alto contenido de arsénico en medio cloruro-cloruro.* **O. Herreros, G. Fuentes, R. Quiroz y J. Viñals.** 90-98, Madrid : revista de metalurgia, 2003.
3. **Escalona, Luis Marín.** *Aglomerado y curado en el proceso de lixiviación de minerales.* s.l. : Metsolver, 2007.
4. **Instituto de Seguridad y Trabajo (IST).** *Decreto de Supremo n°148, Manejo de Residuos peligrosos.* Santiago : s.n., 2003.
5. **FLOWSERVE.** *Bombas para minería y para procesamiento de mineral.* Buenos aires : s.n., 2014.
6. <http://www.gencat.cat/>. [En línea] 5 de 02 de 2015. [Citado el: 17 de 04 de 2015.]
http://www.gencat.cat/empresaiocupacio/departament/centre_documentacio/publicacions/seguretat_salut_laboral/guies/lilibres/construccio_accessible/esp/04/04_02.pdf.
7. **Comisión Chilena de Cobre.** *China desarrollo económico y consumo de Cobre.* Santiago : COCHILCO, 2008.
8. **pulso, El.** www.elpulso.cl. [En línea] 20 de octubre de 2014. [Citado el: 16 de abril de 2015.] <http://www.pulso.cl/noticia/empresa-mercado/empresa/2014/10/11-51910-9-cochilco-preve-que-consumo-de-cobre-chino-crezca-45-en-2015.shtml>.
9. **CODELCO.** www.codelcoeduca.cl. [En línea] 7 de enero de 2015. [Citado el: 16 de abril de 2015.] <https://www.codelcoeduca.cl/codelco/produccion.asp>.
10. **Timmerhaus, peters and.** *Plants Design and Economics for Chemicals Engineers.*

11. **Portero, María José Muñoz.** *Construcción de los diagramas de Pourbaix para los sistemas metal-agua.* s.l.: Escuela Técnico Superior de Ingeniería, Departamento de ingeniería Química y Nuclear.
12. **COCHILCO.** *El mercado Chileno del ácido Sulfúrico proyectado al año 2022.* Santiago : Dirección de estudios Vicente Pérez Vida, 2013.
13. **Moreno, Nicolas Miranda.** *Factibilidad Técnica de la aglomeración y posterior lixiviación de minerales oxidados, sulfurados y mezclas con cloruro de Sodio y Sulfato Ferrico.* Valparaíso de Chile : Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012.
14. <http://mineria.tecnipak.com/>. [En línea] 8 de 01 de 2015. [Citado el: 16 de 04 de 2015.]
http://mineria.tecnipak.com/subcategorias/Correas_transportadoras.html.
15. slideplayer. [En línea] [Citado el: 17 de 4 de 2015.]
<http://slideplayer.es/slide/38254/>.
16. **Escalona, Luis Maín.** *Agglomerado y curado en el proceso de lixiviación de minerales.* s.l. : Metsolver, 2007.
17. **Órdenes, Matías Álvarez.** *Lixiviación ácida no-oxidativa de Calcopirita a 70°C (memoria de título).* Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2012.

ANEXOS:

Anexo A: Definiciones de memoria

Anexo B: Procedimientos de Laboratorio

Anexo C: Registro fotográfico trabajo experimental

Anexo D: Resultados trabajo experimental

ANEXO A:

A-1 Diagrama de Estabilidad Eh-pH (Pourbaix)

La termodinámica proporciona las herramientas necesarias para que ocurra la reacción química, en el caso que nos compete, nos centraremos en la estabilidad del Cobre, Fe por medio de los diagramas de Pourbaix. (11)

Para lograr la disolución de un sólido se deben destruir los enlaces de la estructura que ejercen las moléculas entre ellas, es por esto que necesitan una cierta cantidad de energía. Una vez separados estas moléculas pasan a ser parte de la solución.

Los equilibrios químicos y electroquímicos se resumen normalmente en los diagramas de Pourbaix, los cuales son diagramas potencial-pH. Los diagramas de Pourbaix son “una presentación gráfica que muestra las regiones de estabilidad termodinámica de las especies del sistema en los sistemas metal-electrolito acuoso”. Los diagramas de Pourbaix se usan ampliamente para predecir procesos de corrosión. Dichos diagramas representan las áreas de estabilidad termodinámica de las especies sólidas o acuosas en función del potencial y del pH a la temperatura de interés. De este modo, los diagramas indican bajo qué condiciones de potencial y pH el metal es estable termodinámicamente (o inmune a la corrosión) y bajo qué condiciones puede causar su disolución para formar iones (corrosión) o su transformación en óxidos, hidróxidos, hidruros o sales metálicas que pueden producir pasivación.

El diagrama 12 muestra que se deben tener potenciales eléctricos altos y pH bajos para mantener el ion de Cobre en estado 2+. Lo que se va haciendo difícil en el transcurso del tiempo por las reacciones parasitas que ocurren, generando distanciamiento de la zona de estabilidad.

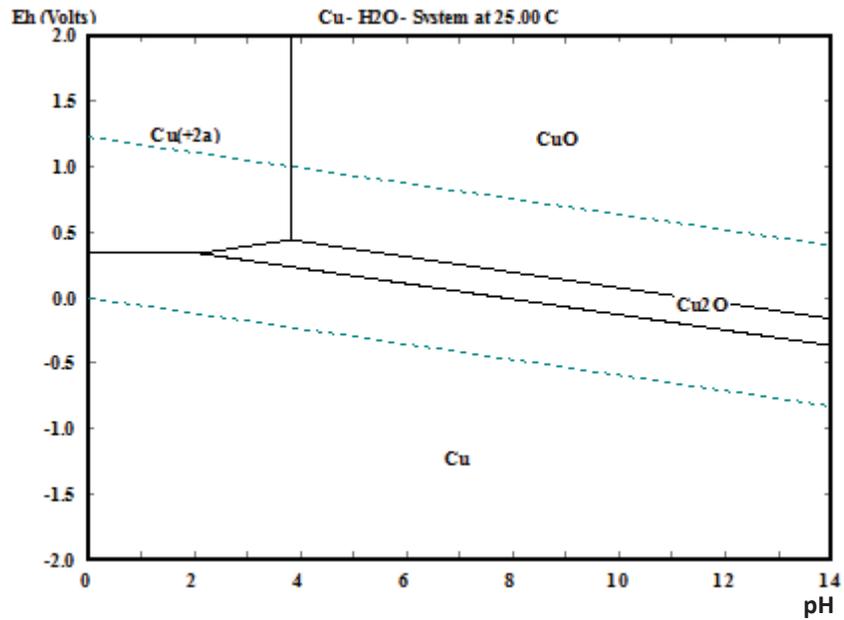


Figura 12. Diagrama de estabilidad del sistema Cu-H₂O, a 25 °C.

El diagrama de la figura 13 (pág. 58) muestra la estabilidad del hierro en la solución, podemos observar que para mantener el hierro con un estado de oxidación de +3 debemos tener valores de potencial muy elevados, esto es, difícil de lograr ya que a medida que ocurren las reacciones químicas el potencial comienza a disminuir y el ácido se va consumiendo aumentando los valores de pH alejándose del campo de estabilidad del Fe^{+3} .

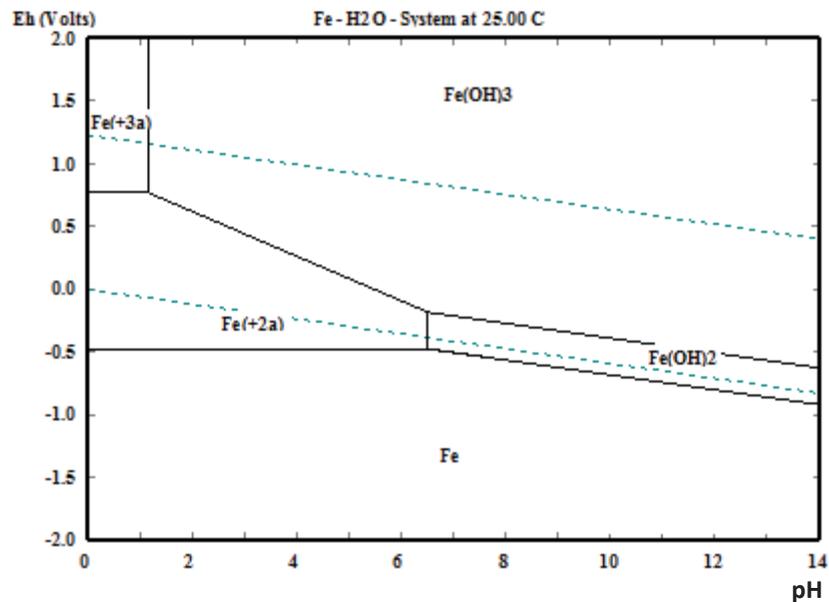


Figura 13. Diagrama de estabilidad del sistema Fe-H₂O a 25°C

El campo de estabilidad del complejo CuCl^+ , Figura 14, es donde nuestros valores resultantes de potencial y pH se mantienen en las pruebas metalúrgicas, el complejo formado es un gran oxidante, experimentalmente se ha demostrado que sirve para lixiviar minerales sulfurados.

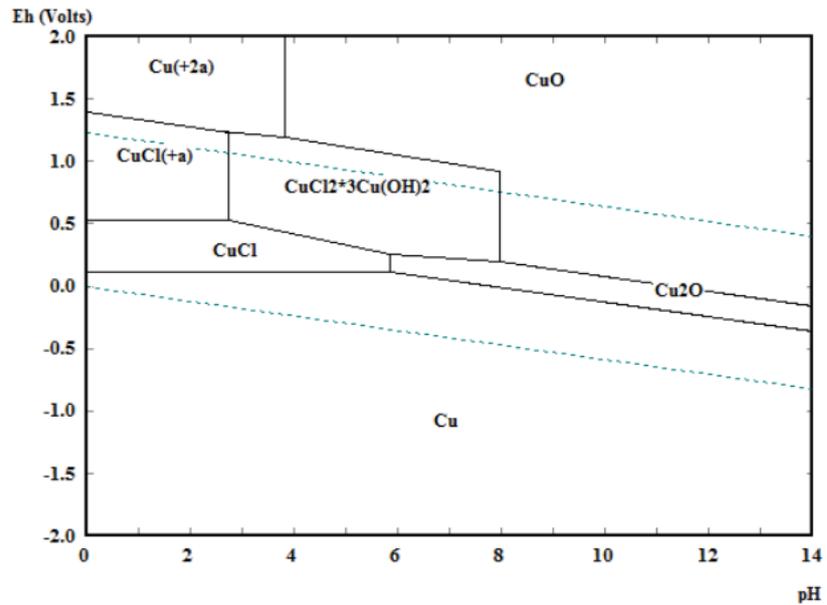


Figura 14. Diagrama de estabilidad del sistema Cu-Cl-H₂O a 25°C

En la figura 15 el diagrama de estabilidad Eh-pH corresponde al sistema Fe-Cl-H₂O, donde la reacción predominante corresponde al complejo FeCl_2^+ y es el complejo predominante en los minerales sulfurados que contienen elevadas cantidades de hierro en solución.

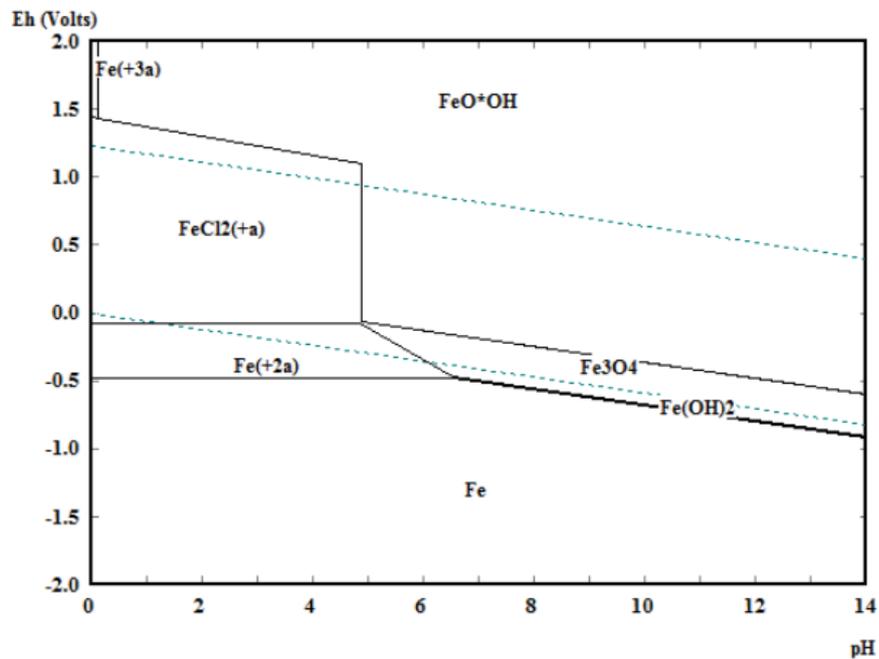


Figura 15. Diagrama de estabilidad del sistema Fe-Cl-H₂O a 25°C.

A-2 Arsénico

A-2.1 Generación de Arsénico en la planta

En la planta S-X los polvos que son tratados en el proceso de lixiviación generan un residuo, con un contenido importante de arsénico, el que debe ser tratado para su eliminación. Estos residuos son acumulados en la propiedad por un período de tiempo antes de eliminarlos, para que suceda esto son empaquetados y transportados fuera de la empresa (por la empresa Hidronor). Y así sean puestos directamente en una unidad de residuo o tratamiento regulado.

A-2.2 El arsénico como veneno

Los efectos del Arsénico en el cuerpo han sido conocidos por más de cuatro mil años; su legado como sustancia toxica, tanto intencionalmente como accidentalmente, ha sido documentado en relatos ficticios e históricos.

Como veneno agudo, el Arsénico posee una dosis letal mediana, que es letal el 50% de las veces, por ingestión (DL50) de la sustancia pura.

Las demás formas de arsénico son más o menos toxicas; por ejemplo, una ingestión de 15 mg/kg para el trióxido de Arsénico; 1,5 mg/Kg para la Arsina y dosis DL50 mayores para formas orgánicas.

A-2.3 Como se trata su eliminación

Existe una norma legislativa para el procedimiento por el cual se debe tratar un residuo toxico dependiendo de la concentración toxica de él. La forma de discriminación para el residuo se basa en el decreto 148, articulo 14 donde se ve la concentración máxima permisible (CMP). La cual consta de 5 mg/l.

El tratamiento del Arsénico en un residuo sólido no se hace en la planta de Hidrometalurgia. Actualmente en la planta se trata el Arsénico en solución y es transformado al estado sólido, como Arseniato Férrico, y son acumulados en bolsas para luego ser transportados a vertederos.

En este proyecto el arsénico se trata como residuo de lixiviación por pila quedando en el ambiente y es importante ver el efecto que puede causar en la minería y determinar su costo económico.

Por lo que se midió la concentración de los residuos entregando los siguientes resultados

Concentraciones de As	[g/l]
Prueba 1	15
Prueba 2	1,2
Prueba 3	0,8

Tabla 18. Balance final al arsénico de los residuos en la lixiviación

El método más utilizado para la eliminación de residuos sólidos es el vertedero controlado

A-2.4 Vertidos Controlados

Eliminar los residuos sólidos en lugares controlados es la forma más económica. La elección de los vertederos se debe realizar adecuadamente para que no se produzca contaminación ambiental, sea en la superficie o los acuíferos subterráneos.

Los suelos destinados como vertedero, deben poseer poca capacidad de filtración, estar alejados de manantiales fluyentes o subterráneos, y no ser susceptibles de inundación, tanto por aguas fluviales como aguas pluviales. Además, las labores de acondicionamiento de los suelos deben enfocarse a evitar que las zonas más altas drenen hacia el vertedero, por ejemplo, mediante desvío o canalización hacia otras superficies más bajas.

Tras las labores de acondicionamiento perimetral, se habilita el suelo del vertedero mediante el allanamiento y excavado de zanjas. En ella se depositan los residuos en forma de capas. Las cuales poseen una altura aproximada de 3 metros cada una. Cada capa se cubre con tierra y se prensa con máquinas.

A-2.5 Costos de confinación al Arsénico.

Ítem	Elemento	Servicio	Unidad de Medida	Cantidad a Facturar	Costo Unitario UF/ton	Costo Total, UF	Costo Total, \$
1,1	Residuo de As	Transporte	ton	3.195,53	0,5	1.597,77	\$39.916.899
1,2	Residuo de As	Inertización y Confinamiento	ton	3.195,53	3,42	10.928,71	\$273.031.590
TOTAL					3,92	12.526,48	\$312.948.489



Tabla 19. Factura de servicios de confinamiento para el Arsénico residual en Fundición.

Según el balance de masa los residuos tóxicos mensuales son de 38,87 [ton].

Mientras que el valor de la U.F. actualmente es de 25.132,64 pesos

Por lo tanto el costo asociado a los residuos con Arsénico es de:

$$38,87 \frac{\text{ton}}{\text{mes}} * 3,92 \frac{\text{U.F.}}{\text{ton}} * 25.132,64 \frac{\text{pesos}}{\text{U.F.}} * \frac{\text{dolar}}{674 \text{ pesos}} * 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 68.180,5 \frac{\$}{\text{año}}$$

Por lo tanto el costo de confinamiento anual es de 68.1280, 5. Este gasto se dispone en los gastos de operación en la evaluación financiera.

A-3 Aglomeración

En la lixiviación en pilas a diferencia de otros tipos de lixiviación, el mineral a lixiviar tiene una ley relativamente baja y, por lo tanto, económicamente paga por un tratamiento más complejo a través de una planta de chancado al menos de tipo secundario y usualmente, terciario. Cuando se usa una granulometría más fina, entonces es necesario aglomerarlos para restituir su permeabilidad al lecho del mineral que se va a lixiviar. Adicionalmente al agua, cuando se lixivian minerales de cobre, se aprovecha de agregar ácido concentrado, para efectuar el curado ácido.

Esta secuencia combinada de operaciones, en que la lixiviación en pilas, se realiza sobre un mineral finamente chancado, aglomerado con agua y curado con ácido concentrado. Esto se conoce como proceso de lixiviación TL y su uso se ha generalizado para el tratamiento de minerales de cobre ya sean oxidados o sulfurados.

A continuación se hace una descripción detallada de las operaciones de aglomeración.

A-3.1 Curado con ácido

Si se considera la adición de una solución lixivante en la parte superior de una pila de mineral. Se puede ver que inicialmente esta solución presenta condiciones de Eh (potencial) y de pH correspondientes al campo de estabilidad de ion Cu^{2+} .

Sin embargo, el mineral que se está tratando, presenta una ganga reactiva o moderadamente reactiva, a medida que progresa la lixiviación ácida en un frente descendente, el ácido se va consumiendo. Lo mismo ocurrirá si la altura del lecho de mineral es mayor, tal que el ácido se consuma antes de llegar a la parte inferior de la pila. En estos casos se tiene un frente de reacción que impone una acelerada variación, en sentido negativo, del valor de Eh y un aumento de pH.

Si la velocidad de reacción de la solución con el mineral y la ganga es mayor que la velocidad de reposición del ácido, entonces se puede llegar a perder la totalidad de los iones férricos y, en breve, dejaran de estar en el dominio del campo de estabilidad del ion Cu^{2+} , y pasaran al campo de estabilidad de la

crisola, el cobre nativo o la calcosina. En este punto la solubilidad del cobre es menor que 10^{-6} molar, es decir es insignificante.

Si la reacción con el ácido ocurre arriba en el lecho del mineral, la baja solubilidad del cobre en las soluciones neutralizadas puede conducir a una precipitación de todo el cobre disuelto en la parte superior sin generar una buena percolación en la pila. Los precipitados más corrientes de estos casos incluye cobre nativo, Delafosita y Calcosina. Sólo si la neutralización se produce en la parte inferior del lecho del mineral, puede ocurrir que el Cobre disuelto no alcance a precipitarse, pero queda en evidencia, que será muy difícil realizar la disolución del cobre remanente en las zonas de más debajo de la pila de mineral.

Resulta claro, entonces, que es indispensable que el ácido quede distribuido lo más uniformemente posible a lo largo del camino de las soluciones de lixiviación. Idealmente debe haber un ambiente de acidez lo más uniforme posible, en todo el camino de las soluciones lixiviadas, sin embargo, eso obligaría alternativamente a:

- Agregar exceso de ácido en las soluciones de entrada, con el riesgo de un mayor consumo global, o bien.
- Limitar la altura de pilas del lecho de mineral que se someten a lixiviación, o bien, por último
- Aceptar menores recuperaciones en el conjunto.

Para solucionar este punto en específico, se ha ideado incorporar un pre-tratamiento con ácido concentrado al mineral que se ha de colocar en el lecho de minerales a lixiviar. Este ácido es uniformemente distribuido, previo a su ubicación en pilas, logrando con esto, una dosificación a la medida de cada requerimiento, ya sea por parte de los minerales del yacimiento, o parte de la ganga. Este pre-tratamiento es llamado aglomerado y la dosificación, cantidad y concentración de ácido Sulfúrico, se determina experimentalmente.

Además, la distribución anticipada del ácido permite que este reaccione sobre todas y cada una de las partículas del mineral, logrando una acción de transformación de las especies minerales de cobre que están próximas a la superficie, normalmente en sulfato de cobre. Con este método se ha logrado

inhibir la disolución de algunas especies indeseables de la ganga como el aluminio y la sílice (SiO_2).

Cuando, una vez armada la pila, se aplica las soluciones de lixiviación. Éstas se encuentran en toda trayectoria a través del lecho de mineral ya acidulada y, en muchos casos, sin consumir una mayor cantidad de ácido, se limitan a disolver el sulfato de cobre ya producido por el pre-tratamiento del ácido. Este pre-tratamiento con ácido concentrado ha recibido el nombre de curado ácido.

A-3.2 Efecto de la ganga en el grado de penetración de las partículas.

Existe una influencia de la ganga a nivel microscópico, correspondiente a la penetración al interior de los poros de una partícula individual. De esta manera, es habitual observar un frente de reacción hacia el interior de una partícula, tal como se muestra en la figura 16.

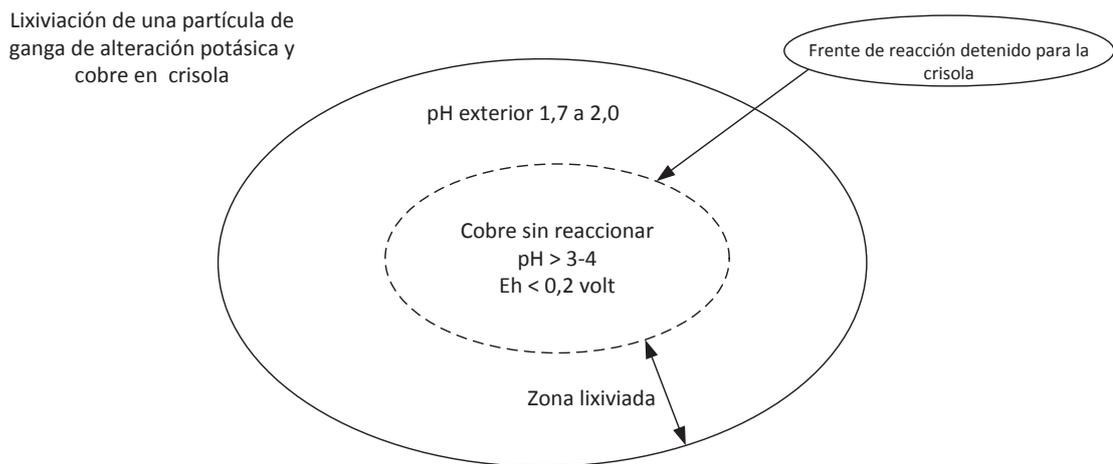


Figura 16. Recuperación de cobre en presencia de ganga.

En efecto, si se tiene, por ejemplo, una lixiviación que requiere solo ácido, o bien, ácido y férrico, puede ocurrir que la partícula se vea completamente atacada en términos de las especies que contienen hierro y éste se haya disuelto enteramente, incluso hasta el interior de ella. Sin embargo, en estos casos, es frecuente observar que el cobre se ha lixiviado sólo hasta cierto límite, donde se ve un contorno en forma de anillo, hasta el cual se limita la reacción, y más allá de él, hacia el interior de la partícula, el cobre permanece intacto. Esto ocurre cuando la ganga va consumiendo el reactivo, sea este H^+ solamente, o bien H^+ y Fe^{3+} .

Las condiciones se deben determinar experimentalmente.

- Tamaño de la partícula
- Cantidad y concentraciones del ácido de curado, $NaCl$, Fe^{3+}

A-3.3 Tipos de aglomerado:

A-3.3.1 Aglomeración por humedad

Este es el proceso más simple de aglomeración y consiste en humedecer el material con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial suficiente, para que al colisionar las partículas entre sí, los materiales finos se adhieran a los gruesos. Esta aglomeración suele ser débil y sólo se emplea en casos fáciles, con bajo contenido de finos.

A-3.3.2 Aglomeración por adherentes

Existen ciertos materiales que pueden mejorar la adherencia de las partículas finas a las gruesas, prolongando esta unión tanto en la manipulación como la operación de lixiviación. Estos materiales adherentes o aglomerantes han sido ampliamente estudiados, principalmente por el United States Bureau of Mines (USBM) de EE.UU., determinando experimentalmente tres parámetros principales de proceso:

- El tipo y cantidad de aglomerante añadido a la alimentación seca.
- La humedad necesaria en la mezcla mineral/aglomerante.
- El periodo de curado para favorecer los puentes de silicato cálcico.

Teóricamente, la aglomeración con aglutinantes es un proceso no bien definido, parece ser que es similar a la floculación, es decir, se forma una especie de coagulación por unión de partículas arcillosas coloidales con los agentes y electrolitos en solución. Se forman así aglomerados porosos muy estables y resistentes a la manipulación y condiciones de lixiviación.

A-3.4 Características y factores de la aglomeración.

Para que se realice una buena aglomeración, especialmente en los Polvos de Fundición, se deben considerar ciertas características del material mineralizado, entre las que se tienen el tamaño y la geometría de las partículas, granulometría, características geológicas, condiciones ambientales, evaporación del agua, humedad del curado y el tiempo de curado, entre otras.

En términos generales, para una buena aglomeración es recomendable que:

La adición del o los aglomerantes se realice sobre el material relativamente seco. Por ejemplo, realizarla en la trituración o chancado si está incluido en el esquema de tratamiento.

La mezcla entre el mineral y aglomerantes sea lo más íntima posible. Adicionar la cantidad de líquido o de solución que sea necesaria para alcanzar la humedad óptima de aglomeración.

Se considera un cierto tiempo de reposo o curado, antes de proceder a la lixiviación. A mayor cantidad de finos, se necesitara más aglomerantes y más tiempo de curado. Como mínimo debe existir un período de reposo de unas 24 horas.

La aglomeración se puede efectuar tanto en medió ácido, con las particularidades que se describen en el siguiente apartado.

A-3.5 Medio ácido

Este medio es típico de la lixiviación de minerales de cobre, el mismo lixiviante ácido se puede emplear como aglomerante, generalmente en forma de ácido sulfúrico concentrado. La cantidad de ácido se determina experimentalmente por ensayos. Se ha propuesto también el empleo de aglomerantes ácidos sólidos, como los sulfatos (yeso), pero no es normal por efectos perniciosos de las posibles incrustaciones por precipitación posterior en pilas y tuberías.

Tipo de mineral	Granulometría	Sistema de aglomeración	Aglomerantes
Cobre	Gruesa de 15 mm o similar	Sistema simple de cinta transportadora	Ácido Sulfúrico
Cobre	fina (-15 mm o similar) Limitada cantidad de arcillas	Tambor rotatorio	Ácido Sulfúrico

Tabla 20. Mineral, aglomerante y tipo de aglomeración para el mineral

A-3.6 Equipos Aglomerantes

Aun cuando hay opciones que agregan agua y ácido directamente sobre el mineral en una correa, esta práctica no resuelve el problema de lograr una óptima mezcla y efectivamente aglomerar en forma homogénea las partículas más finas en torno a las más gruesas. En efecto, esto se puede lograr en forma muy eficiente si se establece una rotación de las partículas húmedas en torno a sí mismas, lo que permite a las fuerzas cohesivas de tensión superficial correspondientes, por puentes líquidos denominados pendular y funicular, mantener a las partículas unidas entre sí, facilitando su transporte y apilamiento. Una vez formada la pila de lixiviación, se observa que el lecho conserva la mayor parte de estas virtudes de alta permeabilidad líquida y gaseosa correspondientemente al producto poroso originalmente formado durante la aglomeración.

Considerando la alta ley de los polvos tratados, se usó ácido concentrado para el aglomerado.

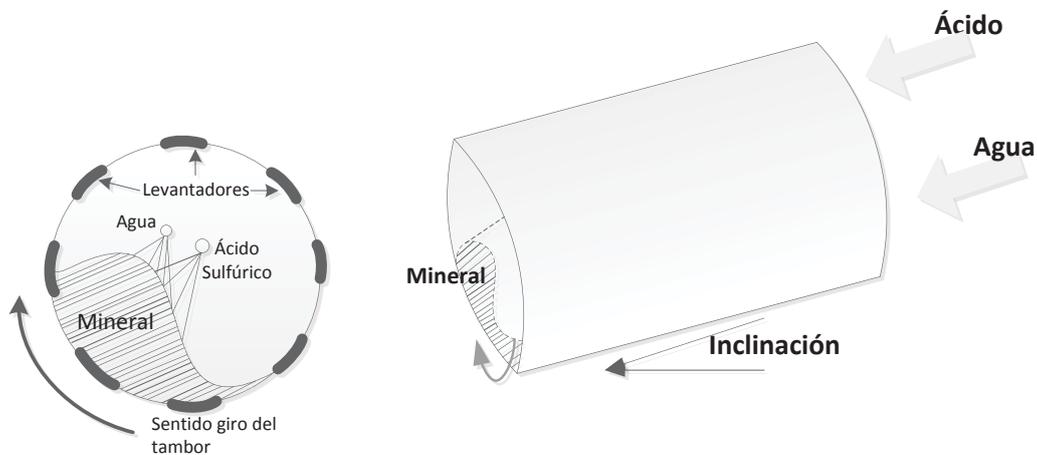


Figura 17. Tambor aglomerador

A-4 Estabilización del Arsénico.

A-4.1 Química de la lixiviación Estándar

En las condiciones físico-químicas del sistema lixivante (pH 0,65), potencial óxido reducción de + 300 [mV], las únicas especies de ser lixiviadas son los óxidos metálicos de Cu y Fe y los anfóteros de Bi y As.

Con este potencial de óxido reducción, las especies sulfuradas no son susceptibles de lixiviación ya que son termodinámicamente estables. El Cobre se encuentra al estado Cu^{2+} y Cu^+ , el Arsénico se encuentra principalmente al estado de As^{+5} , el Molibdeno como Mo^{+5} y el bismuto al estado Bi^{+3} .

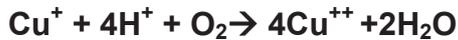
Los principales elementos que lixivian en esta etapa son Fe, Cu, As de acuerdo a las siguientes reacciones:

A-4.2 Lixiviación del Cobre

La cuprita es lixiviada de la siguiente relación estequiométrica.



El ion cuproso resultante Cu^+ es oxidado ya sea por el oxígeno disuelto de acuerdo a la reacción



O por iones férricos provenientes de la disolución de óxidos que contengan (Fe_2O_3 o Fe_3O_4) de acuerdo a la siguiente reacción



El óxido cúprico se lixivia de acuerdo a



A-4.3 Lixiviación del Hierro

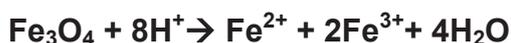
El óxido ferroso se lixivia según:



El óxido férrico de acuerdo a:



Y la magnetita:



La lixiviación de los compuestos oxidados de Cu y Fe se ve favorecida por un aumento de la acidez del medio, debido a que el ion Hidrógeno es el agente lixivante

A-4.4 Lixiviación del Arsénico

El pentóxido de Arsénico, As_2O_5 , se lixivia según la siguiente reacción:

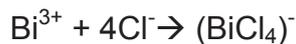


La lixiviación de arsénico genera una disminución del pH de la solución, por lo tanto, un aumento de la acidez influirá en forma negativa en la lixiviación de este elemento. El ambiente oxidante requerido ayuda oxidando otras especies de As menos oxidadas.

A-4.5 Química de Lixiviación de Bismuto

El Bismuto en las condiciones físico-químicas de la lixiviación estándar, es inestable, ya que se hidroliza fácilmente para dar origen a hidróxido de Bismuto que precipita y queda en los rios de la lixiviación estándar.

Para lograr la disolución del Bi y mantenerlo en la solución es necesario acomplejarlo, lo que se logra mediante la reacción con un gran exceso de cloruro según:



A-4.6 Química de la precipitación de Arsénico

La especie química más estable del Arsénico es el arseniato férrico (escorodita amorfa), FeAsO_4 ($\text{pK}=22,89$), para el efecto es necesario oxidar el ion ferroso presente en ion férrico, lo cual se efectúa mediante adición de peróxido de hidrógeno.

Sin embargo, en las condiciones, $\text{pH}<3,0$, que tienen las soluciones de lixiviación, el ácido Arsénico, H_3AsO_4 , es más estable que el arseniato férrico y por lo tanto éste no precipitará en forma cuantitativa, por lo que es necesario efectuar un ajuste de pH, a un valor tal que el arseniato férrico sea más estable, valor que está comprendido entre 3 a 3,5.

A pH superior de 3,5, el hidróxido férrico es más estable que el arseniato férrico, produciéndose la disolución de éste y al mismo tiempo la precipitación del hidróxido de cobre.

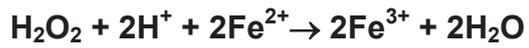
Por la química del sistema, es conveniente realizar el ajuste de pH primero y posteriormente la oxidación del ion ferroso, ya que este tiene una estabilidad en un rango mayor de pH que el ion férrico.

El aumento de pH origina también la precipitación del bismuto y las reacciones involucradas son las siguientes:

Hidrolisis del Bismuto



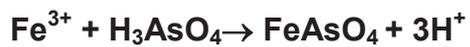
Oxidación del ion ferroso



Oxidación del As^{3+}



Precipitación del arseniato férrico:



A-5 Lixiviación

Se define como un proceso mediante el cual es posible disolver un compuesto metálico soluble contenido en un mineral, pasando el metal al estado ion, mediante un solvente adecuado o líquido extractor.

En lixiviación, la cantidad de material soluble a separar es, generalmente mucho mayor que en el lavado de las filtraciones ordinarias, de forma que las propiedades de los sólidos pueden variar considerablemente durante la operación de lixiviación. Los sólidos gruesos compactos o granulares pueden ser desintegrados para formar una pulpa o pasta cuando se elimina su contenido en material soluble. Sobre todo en el caso de los polvos de fundición con alta ley de solubles.

A-5.1 Factores que intervienen en una lixiviación

Tamaño de partícula: Un menor tamaño aumenta la extracción y disminuye el tiempo de contacto en el mineral y el lixivante

Concentración del disolvente o lixivante: El aumento de concentración del lixivante incide en la extracción, pero disuelve elementos no favorables a la oxidación de Cobre, generalmente se usa H_2SO_4 al 5%.

Tiempo de contacto y temperatura. El tiempo de contacto depende de los factores anteriores, un aumento de la temperatura provoca un aumento en la velocidad de extracción. En hidrometalurgia se lixivia a temperatura ambiente.

A-5.2 Descripción general de los métodos de Lixiviación Cupríferos.

A-5.2.1 Lixiviación en Pilas

Es la técnica de lixiviación de cobre más antigua. Se utiliza en la lixiviación de menas porosas oxidadas, que son apiladas en una cancha previamente preparada.

En la preparación de la cancha, el piso debe ser impermeabilizado y contar con una leve pendiente o inclinación, para permitir la recolección de las soluciones que son irrigadas al lecho. El volumen del lecho de la pila, tiene un rango amplio según sea la escala de operación.

A-5.2.2 Lixiviación en Batea o percolación

Esta técnica consiste en contactar un lecho mineral con una solución acuosa que se inyecta en forma ascendente o descendente, que filtra e inunda el estanque. La geometría del lecho establece el estanque (rectangular, cilíndrico), ésta debe contar con un fondo falso filtrante que permite el drenaje de las soluciones.

A-5.2.3 Lixiviación por agitación

Las Menas⁶ de cobre a tratar por este método, deben presentar una ley alta, debido a que el mineral debe ser molido finamente, lo cual conlleva mayores costos en la conminución.

Sus ventajas comparativas con otros métodos son:

- Alta extracción del cobre soluble.
- Tiempos de contacto en los estanques cortos (6 a 9 horas).
- Proceso continuo.
- Facilidad para tratar menas alteradas o generadoras de finos.

⁶Mena: es un mineral del que se puede extraer un metal valioso, porque lo contiene en cantidad suficiente para poderlo aprovechar.

Uno de los mayores esfuerzos que se requiere para la pulpa lixiviada es la recuperación de la solución rica y la entrega de un relave⁷ con bajo contenido de cobre en solución. La lixiviación de la pulpa, se realiza en un batería de reactores agitados neumáticos o mecánicos, donde se efectúa el ataque de los sólidos. Los reactores agitados se conectan en serie y el porcentaje de sólidos en ellos oscila entre un 33% a 50%, por lo general se producen reacciones exotérmicas y de difusión del ácido, oscilando la temperatura entre 30° 50° C.

Los métodos a utilizar para los polvos finos fueron lixiviación por agitación, y simulación de pila a través de columnas.

⁷ Relave: desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales.

A-5.3 Disolución de metales.

A-5.3.1 Lixiviación ácida

Este sistema funciona en base a ácido Sulfúrico concentrado, ácido Sulfúrico diluido y Oxígeno, ácido Clorhídrico, Nítrico, Férrico y Tiourea⁸.

A-5.3.2 Lixiviación Alcalina

En estos casos la lixiviación es de tipo amoniacal, con hidróxido de sodio, con cianuro de sodio, con sulfuro de sodio, etc.

A-5.3.3 Lixiviación Neutra

El sistema de disolución comprende la lixiviación con Tiosulfato de sodio y con cloro gaseoso.

A-5.3.4 Lixiviación Bacteriana

En estos casos se emplean diferentes especies de bacterias que son capaces de aumentar la velocidad de disolución de los metales. Estas bacterias son capaces de obtener su energía por oxidación de iones ferrosos presentes en soluciones ácidas, produciendo iones férricos como sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. El sulfato férrico así formado puede atacar sulfuros metálicos, disolviendo el metal por oxidación del sulfuro, y posteriormente, siendo reducido por sí mismo a sulfato ferroso FeSO_4 , completándose así un ciclo cerrado redox $\text{FeSO}_4/\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Hay bacterias que pueden efectuar el ataque directo de los minerales sulfurados produciendo ácido sulfúrico por oxidación del azufre elemental.

Su principal aplicación está en la lixiviación de minerales sulfurados, pero también puede ser utilizado en el tratamiento de minerales oxidados como el uranio. Una ventaja de la lixiviación férrica es que en el medio oxidante, los iones férricos pueden ser fácilmente regenerados y mantenidos en un alto grado de potencial de oxidación. Otro aspecto interesante de este proceso es poder recuperar el azufre contenido en el mineral en su forma elemental.

⁸Tiourea: Es un compuesto nocivo, peligroso para el medio ambiente, tóxico para la reproducción.

A-5.4 Agentes de lixiviación

La selección del agente químico extractante depende de su disponibilidad, costo, estabilidad química, selectividad, facilidad de producir, regenerar y recuperación del cobre en la solución acuosa en forma económica. Desde el punto vista químico, los agentes utilizados en la lixiviación del Cobre se clasifican en:

- Ácidos inorgánicos: ácido Sulfúrico, ácido Clorhídrico, ácido Nítrico.
- Bases: hidróxido de Amonio
- Agentes Oxidantes: Oxígeno, Ion Férrico, ion Cúprico
- Agentes acomplejantes: Amoniaco, Sales de amonio, Cianuros, Carbonatos, Cloruros

El ácido Sulfúrico es el agente más utilizado en la lixiviación del cobre, esto se debe, fundamentalmente, a razones de calidad química, costos de fabricación y disponibilidad. Una fuente de producción del ácido sulfúrico es a partir del SO_2 , el cual, es producido en las fundiciones de Cobre, lo que permite obtener ácido como subproducto a un costo relativamente bajo. En Chile, se produce ácido como subproducto en Caletones, Chagres, Paipote, Ventanas, Chuquicamata.

El consumo de ácido sulfúrico es un ítem de costo altamente significativo en el proceso extractivo, especialmente en las plantas mediana y baja ley de capacidad, ya que por cada Kilo de cobre producido se consume de 2,5-7,0 kilos de ácido, según la mena y el proceso empleado.

A-6 Consumo de ácido Sulfúrico.

Uno de los grandes problemas en la determinación del funcionamiento de la pila, es el que tiene relación con el consumo real del ácido en la etapa de curado y lixiviación. En la actualidad, esto representa un problema debido a que el consumo de ácido programado en la planta se basa, principalmente, en la experiencia adquirida en años de pruebas hechas a escala piloto y por el mecanismo de prueba y error, y en general, se utiliza una gran cantidad de ácido de tal forma que se obtiene un exceso respecto del requerimiento óptimo. (12)

Esto último es un problema, debido a que en Chile resulta especialmente costoso abastecerse de ácido por causa del tamaño del sector cuprífero, escases con respecto a la demanda y lo que obliga a las mineras a pagar tarifas de transporte relacionadas con la importación desde otros países. Este déficit de ácido se debe, principalmente, a problemas de producción de ácido que han afectado a varias fundiciones del país y al aumento de la demanda proveniente de otros sectores industriales además de la minería. (12)

Cerca de un 96% del consumo de ácido, se concentra en el sector minero cuyas faenas se encuentran en el norte del país, mientras que un 45% de la producción de ácido proveniente del sur, lo cual conlleva a costos de transporte que aumentan significativamente los precios.

Como promedio, se consumen 3,1 toneladas de ácido por cada tonelada de cobre refinado proveniente de la ruta hidrometalurgia para minerales oxidados de Cobre, como el precio del ácido ronda en Chile entre los 100 y 150[USD/ton], se gasta aproximadamente 0,2 [USD/lb de Cobre] en este insumo. Este valor podría ir en aumento debido a que en Chile, la demanda de ácido aumenta debido a los nuevos proyectos mineros, mientras que la oferta se mantiene constante, como se observa en la tabla 21, por lo que el precio del ácido depende cada vez más del mercado internacional, haciendo inestable su valor. (12)

Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
PRODUCCIÓN	5.025	4.755	4.858	5.077	5.138	5.272	5.245	5.422
más IMPORTACIONES	607	1.285	2.398	1.872	2.644	3.164	3.211	2.834
menos EXPORTACIONES	-131	-124	-84	-13	-13	-63	-15	-52
CONSUMO APARENTE	5.501	5.936	7.172	6.936	7.769	8.373	8.441	8.204

Tabla 21. Evolución del mercado chileno del ácido sulfúrico 2004-2013, miles de toneladas.

De esta forma, se hace indispensable crear una herramienta que permita predecir el consumo real de ácido sulfúrico, logrando así una estrategia de lixiviación óptima, ahorrando de esta forma el reactivo que puede ser escaso o de alto costo en un determinado período de la operación de una planta industrial. Esta herramienta debe medir la demanda de ácido tomando en cuenta las características físicas y mineralógicas del mineral, es decir, incluir la variabilidad que producen las distintas especies minerales en el consumo de ácido global. (12)

A-7. Cinética de lixiviación

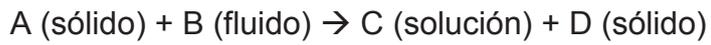
La cinética de lixiviación de los minerales es la determinación de las velocidades y mecanismos de disolución o extracción de los metales de interés económico. (13)

El estudio de la cinética entrega información vital desde el punto de vista práctica y conceptual, ya que por un lado, los estudios cinéticos proporcionan datos de ingeniería valiosos para el diseño y la evaluación de proyectos mineros, por el otro, permiten determinar las condiciones de operación. Además de predecir la velocidad de extracción del cobre en diversas condiciones de temperatura, concentración de agentes lixivante y oxidantes, etc. (13)

Como es sabido, los minerales de cobre oxidados se lixivian rápidamente en ácido en comparación con otros minerales de cobre como los sulfuros secundarios que requieren de oxidación y se lixivian lentamente. No obstante, los sulfuros secundarios de cobre se oxidan y disuelven más rápidamente que la Calcopirita, razón por la cual son a veces llamados "Sulfuros Lixiviables".

La química que involucra la disolución de los minerales de cobre es esencialmente una simple descomposición en el caso de los minerales oxidados, y una reacción de óxido-reducción para el caso de los minerales sulfurados, en donde los productos de las reacciones son solubles en agua. Lo mismo sucede en los variados óxidos, silicatos, carbonatos y sulfatos en la ganga que se someten en reacciones similares para formar sales solubles.

A-7.1 La reacción general que describe la lixiviación es:



Algunos ejemplos específicos de óxidos de cobre, sulfuros y especies de gangas:

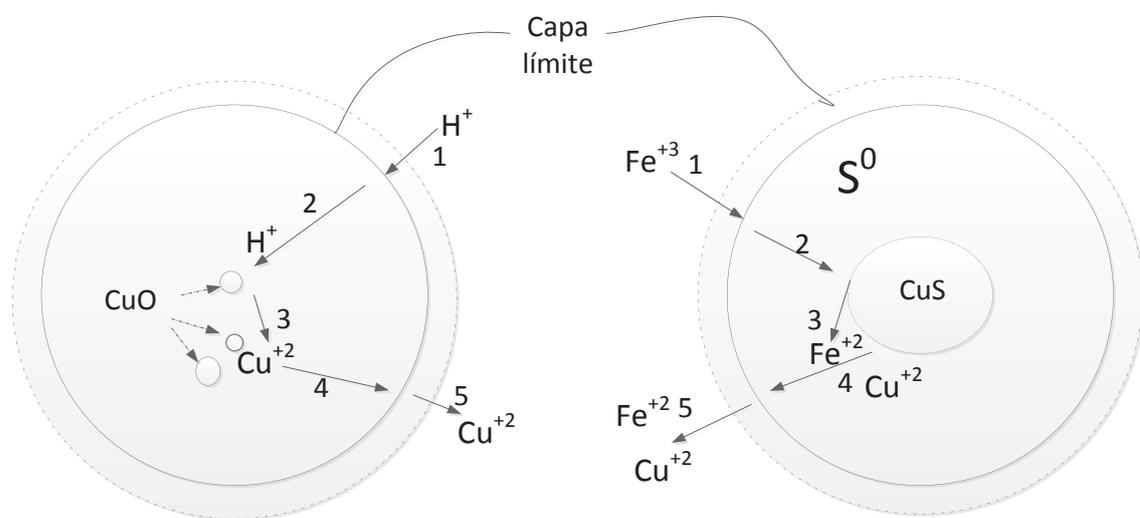
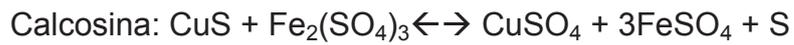
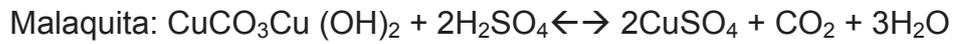


Figura 18. Etapas del proceso de lixiviación para óxidos y sulfuros de Cobre.

A-7.2 Esquema de las etapas de lixiviación.

La velocidad de lixiviación es inicialmente alta ya que el reactivo ataca directamente a las especies de cobre presentes en la superficie de la partícula. Con el tiempo la velocidad decae debido a que la superficie de reacción cada vez se aleja de la superficie de la partícula. Por lo que al reactivo le toma más tiempo desplazarse al interior de la partícula, esto se muestra en la siguiente figura:

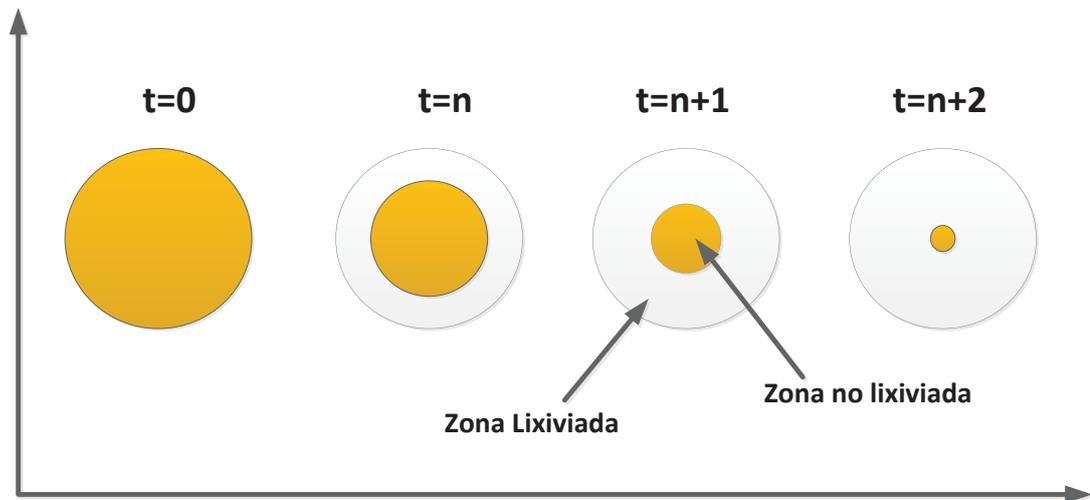


Figura 19. Proceso de lixiviación, cambio de control con el tiempo.

ANEXO B

B-1. Procedimientos de laboratorio

En esta sección se explican los procedimientos utilizados para el análisis de líquidos en los ensayos.

Test de Iso-pH

El procedimiento para esta prueba fue tomar 100 gramos de la muestra en un vaso precipitado para luego agregar 1000 [ml] de refino y comenzar con la lixiviación manteniendo un pH, de 1,7 a 1,8. Esto se logró con un pH-metro constante en el vaso mientras se adicionaba el ácido Sulfúrico.

Determinación de Cu^{++} en la solución

Metodología basada en el yodo (I_2) que queda libre en una solución cúprica en exceso de KI (Yoduro de potasio), en presencia de ácido acético.

El Iodo desprendido es equivalente al cobre presente. Por lo tanto, basta medir el Iodo liberado

Esto se hace titulando con una solución valorada de Tiosulfato de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

-Tomar 5 ml (PLS) en un vaso precipitado

-Agregar 5 ml de amoníaco preparado al 25% v/v para neutralizar (color azulado)

--5 ml de ácido acético, volviendo la muestra a su color natural

-agregar 5 g de Diofloruro de Sodio (NaHF_2), para la eliminación de las impurezas

- $\frac{1}{2}$ cucharada Yoduro de Potasio, la muestra toma un color café.

-3 ml de almidón, como indicador, tomando la muestra un color mas oscuro.

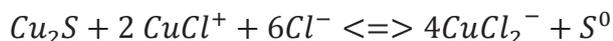
- Finalmente se titula con Tiosulfato hasta que la muestra quede de un color blanco o transparente.

Factor de Tiosulfato= 1,023

$\text{Cu}^{2+}[\text{g/l}] = \text{Gasto de Tiosulfato} * \text{factor}$

B-2 Estimación estequiometrica de Cloruro de Sodio

Según la ecuación:



Y utilizando la base de cálculo de 100 [g] de Polvos de Fundición. Se calculó el Cloruro de Sodio de la siguiente forma

100 g de polvo tenemos un 45% de Cobre Total (CuT) lo que nos da 45 [g] de Cobre.

De esos 45 [g] de Cobre, 18,7 [g] son Óxidos de Cobre y 26,3 [g] Sulfuros de Cobre.

Esto se determina por las características químicas que tienen los polvos.

Luego por las características Mineralógicas se tiene que la mayor parte de los polvos contienen características de Digenita (Cu_9S_5), Cu_2S (Calcosina) y CuS (Covelina), tomando estos datos en cuenta se hizo un promedio estequiometrico el que nos arrojó las siguientes fracciones.

$Y_{\text{Cu}_9\text{S}_5}: 0,74$

$Y_{\text{Cu}_2\text{S}}: 0,16$

$Y_{\text{CuS}}: 0,1$

Calculando su masa molar promedio es de: 326,8 g/mol

Obtenemos 0,080 moles de Sulfuros de Cobre.

La relación que tenemos en esta reacción de una molécula es:

3 moles de Azufre (S) necesitas 24 moles de Cloruro (Cl^-). Por lo tanto para 0,08 moles de Sulfuro de Cobre necesitamos 1,92 moles de Cl^- . Como el reactivo es Cloruro de Sodio (NaCl), entonces necesitamos 1,92 moles de NaCl y su masa molar es de 58,44 g/mol dando un valor de:

$$1,92 \text{ mol} * 58,44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1122 \frac{\text{Kg de NaCl}}{\text{Ton Polvo}}$$

Y como las muestras son de 40 kilos de polvo la relación nos queda de la siguiente forma:

$$1122 \frac{\text{Kg de NaCl}}{\text{Ton Polvo}} * 1 \frac{\text{ton}}{1000\text{Kg}} * 40 \text{ Kg} = 44,88$$

Trabajando con 45 kilos.

B-3. Calculo de reactivos para aglomeración del mineral

Para aglomerar el polvo de fundición es necesario calcular las dosis de reactivos de refino, cloruro de sodio, ácido sulfúrico que se van a agregar a cada muestra, este procedimiento se explica a continuación.

Los datos con los que se trabajó son:

Masa Mineral= 40000 [g] $\rho_{\text{refino}}: 1,05 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Humedad mineral= 0% $\rho_{\text{ácido sulfúrico}}: 1,84 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Pureza H₂SO₄= 97% acidez refino= 12 [g H₂SO₄/L]

Como caso general se verá la muestra que contiene sal, junto a una serie de formulas con que se calculan las dosis de reactivos al igual que una tabla resumen con las dosis agregadas.

Primero se calculó la cantidad de mineral seco

Acidez Refino

Primero cantidad de mineral seco:

$m_{\text{mineral seco}}[\text{g}]: 40000$

Para calcular la masa de líquido total, para alcanzar la condición de un cierto % de humedad en el glómero en el caso de un mineral la ecuación es:

$$M_{\text{líquido total}}[\text{g}] = m_{\text{mineral seco}} * \frac{\frac{\text{Humedad de mineral \%}}{100\%}}{1 - \frac{\text{Humedad de mineral \%}}{100\%}}$$

$$M_{\text{líquido total}} [\text{g}] = 40000 * \frac{\frac{10\%}{100\%}}{1 - \frac{10\%}{100\%}} = 4444,4 \text{ g}$$

Para calcular la masa de ácido sulfúrico en el refino, debemos calcular la masa de refino de la siguiente manera:

$$m_{\text{refino}} [\text{g}] = \frac{\left(m_{\text{líquido total}} [\text{g}] - m_{\text{mineral}} [\text{g}] * \frac{[\%] \text{humedad mineral}}{100\%} \right) * \frac{[\%] \text{pureza}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{100\%} - \frac{\text{Kg}^{\text{H}_2\text{SO}_4} * m_{\text{mineral seco}} [\text{g}]}{\left(\frac{1000 \text{Kg}}{1 \text{TMS}} \right)}}{\frac{[\%] \text{pureza}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{100\%} - \frac{\text{acidez}_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}{1000 * \rho_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}}$$

$$m_{\text{refino}} [\text{g}] = \frac{\left(4444,4 [\text{g}] - 40000 [\text{g}] * \frac{0[\%]}{100\%} \right) * \frac{97[\%]}{100\%} - \frac{100 \text{Kg}^{\text{H}_2\text{SO}_4} * 40000 [\text{g}]}{\left(\frac{1000 \text{Kg}}{1 \text{TMS}} \right)}}{\frac{97[\%]}{100\%} - \frac{12 \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}{1000 * 1,05 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}} = 324,56 [\text{g}]$$

Entonces la masa del ácido del refino será:

$$m_{\text{ácido en refino}} [\text{g}] = \frac{m_{\text{refino}} [\text{g}] \text{acidez}_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}{\rho_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ l}}}$$

$$m_{\text{ácido en refino}} [\text{g}] = \frac{324,56 [\text{g}] 12 \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right]}{1,05 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ l}}} = 3,71 \text{ g}$$

Utilizando la masa de ácido entregada por el refino es posible calcular el resto de ácido que se debe agregar para alcanzar los 100 kg⁺/ Ton de polvo:

$$M_{\text{ácido puro}} [\text{g}] = \left(m_{\text{líquido total}} [\text{g}] - m_{\text{mineral}} [\text{g}] * \frac{[\%] \text{humedad mineral}}{100\%} - m_{\text{refino}} [\text{g}] \right) * \frac{[\%] \text{pureza}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{100\%}$$

$$M_{\text{ácido puro}} [\text{g}] = \left(4444,4 [\text{g}] - 40000 [\text{g}] * \frac{0[\%]}{100\%} - 324,56 [\text{g}] \right) * \frac{97 [\%]}{100\%} = 3996,29 [\text{g}]$$

Dado que el ácido utilizado está al 97% es necesario adicionar una cantidad mayor, dando:

$$M_{\text{ácido (97\%)}} [\text{g}] = M_{\text{ácido puro}} [\text{g}] * \frac{100\%}{97\%}$$

$$M_{\text{ácido (97 \%)}}[g] = 3996,29 [g] * \frac{100\%}{97 \%}$$

Finalmente el Volumen de refino, ácido, NaCl se calcula como:

$$V_{\text{refino (cm}^3\text{)}} = \frac{m_{\text{refino}}[g]}{\rho_{\text{refino}} \left[\frac{g}{\text{cm}^3} \right]}$$

$$V_{\text{ácido (cm}^3\text{)}} = \frac{m_{\text{ácido(97 \%)}}[g]}{\rho_{\text{ácido}} \left[\frac{g}{\text{cm}^3} \right]}$$

$$m_{\text{NaCl}}[g] = \frac{\frac{\text{Kg NaCl}}{1000 \text{ Kg}}}{1 \text{ TMS}} * m_{\text{mineral seco}}[g]$$

Aplicando estas fórmulas es posible calcular las dosis de reactivos para cada aglomeración realizada durante la tesis para los polvos de Fundición.

ANEXO C

C-1 Registro fotográfico trabajo experimental



Imagen 5. Montaje de columnas en el laboratorio de operaciones unitarias



Imagen 6. Filtros para las columnas que se montaron en el laboratorio



Imagen 7. Muestra de polvo convertidor Teniente sin aglomerar, día 0



Imagen 8. Muestra de polvos convertidor teniente después de agregar acido para la aglomeración.

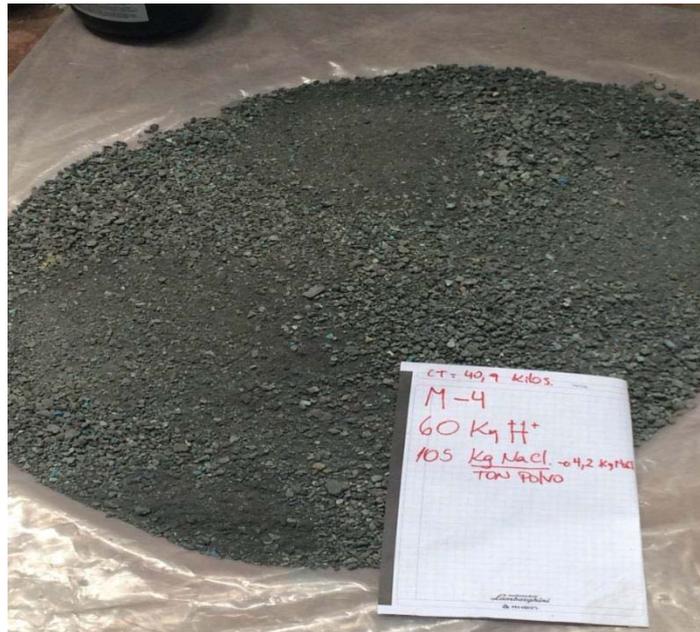


Imagen 9. Muestra de polvo convertidor Teniente y Pierce Smith antes de la aglomeración, día 0

ANEXO D**Anexo D: Resultados trabajo experimental****D-1. Análisis granulométrico****Granulometría polvos Teniente**

i	Malla #	Abertura (μm)	Retenido [g]	Porcentaje [%]	Porcentaje acumulado pasante [%]
1	8	2360	0	0	100
2	10	1700	3,2	0,32	99,68
3	14	1180	1	0,1	99,58
4	20	850	0,9	0,09	99,49
5	28	600	1,7	0,17	99,32
6	35	425	3,5	0,35	98,97
7	48	300	11,2	1,12	97,85
8	65	212	42,1	4,21	93,64
9	100	150	93,7	9,37	84,27
10	150	106	140,1	14,01	70,26
11	200	75	103,6	10,36	59,9
12	270	53	61,4	6,14	53,76
13	325	45	15,9	1,59	52,17
14	-325	0	521,7	52,17	
	TOTAL		1000	100	

Tabla 22. Granulometría de los polvos gruesos provenientes de las cámaras de enfriamiento de los convertidores Teniente.

Granulometría Polvos Pierce Smith

i	Malla #	Abertura (µm)	Retenido [g]	Porcentaje [%]	Porcentaje acumulado pasante [%]
1	8	2360	0	0	100
2	10	1700	6,1	0,61	99,39
3	14	1180	1,1	0,11	99,28
4	20	850	0,7	0,07	99,21
5	28	600	4,7	0,47	98,74
6	35	425	40	4	94,74
7	48	300	148,9	14,89	79,85
8	65	212	264,5	26,45	53,4
9	100	150	206,1	20,61	32,79
10	150	106	142,4	14,24	18,55
11	200	75	59,9	5,99	12,56
12	270	53	20,4	2,04	10,52
13	325	45	4,7	0,47	10,05
14	-325	0	100,5	10,05	
	TOTAL		1000	100	

Tabla 23. Granulometría de los polvos gruesos provenientes de las cámaras de enfriamiento de los convertidores Pierce-Smith

D-2 Resultados análisis químicos muestras cabeza

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [ppm]	CuNS [%]
CT`2	54,1	7,4	12800	22,5
CPS`1	76,2	1,3	1110	16,2
CPS`1 met.	94	0,3	1130	
CPS`3	79,4	0,5	830	15,4
CPS`3 met.	94,6	0,1	1010	
CPS`2	80,6	0,9	905	14,9
CPS`2 met.	97,8	0,1	560	
CT`1	46,6	7,2	26450	28,4

Tabla 24. Análisis químico de Cabeza a los polvos por separado L-8617

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [ppm]	CuNS [%]	S [%]
CPS [c]	79,6	1,2	830	17,5	11,2
CT [c]	37,5	3,1	3600	37,1	15,3
CPS [lx]	75,1	1,1	560	11,5	17,6
CT [lx]	32,5	9,9	800	23,7	7,9

Tabla 25. Muestras cabezas y muestras lixiviadas L-8667

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [%]	CuNS [%]	S [%]
CT 2 [c]	47,6	8,8	2,36	17,3	14,3
CPS`3 [c]	78,5	0,62	0,12	20,6	14,4
CPS`1 [c]	79,2	0,73	0,08	19	14,4
CPS`2 [c]	77,5	0,51	0,1	22,7	14,1
CT 1 [c]	42,4	9,2	3,89	20	12,5

Tabla 26. Muestras Cabezas L-8594

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [ppm]	CuNS [%]
CT`2	54,1	7,4	12800	22,5
CPS`1	76,2	1,3	1110	16,2
CPS`1 met.	94	0,3	1130	
CPS`3	79,4	0,5	830	15,4
CPS`3 met.	94,6	0,1	1010	
CPS`2	80,6	0,9	905	14,9
CPS`2 met.	97,8	0,1	560	
CT`1	46,6	7,2	26450	28,4

Tabla 27. Análisis químico, muestras Cabeza L-8617

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [ppm]	CuNS [%]
CPS (10-35)#	70,8	1,8	1310	24,6
CPS (10-35) # met.	85	0,7	865	
CPS (48)#	79,3	1	875	13,6
CPS (48)# met	88,4	0,5	830	
CPS (65)#	79,7	0,9	655	11,7
CPS (65) # met.	90,5	0,4	805	
CPS (100)#	62,9	6,3	910	12,1
CPS (100)# met	78,7			
CPS (150)#	83,2	0,7	800	10,8
CPS (150) # met.	91,5	0,4	810	
CPS (200)#	83,6	1	760	13
CPS (200) # met.	89,9			
CPS (270-(-)325)#	82	1,3	1040	18,6
CPS (270-(-) 325)# met.				

Tabla 28. Granulometría L-8618, cabezas polvos CPS

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [ppm]	CuNS [%]
CT(10-65)# met.	76,9			
CT (100)#	59,7	9,5	9600	13,4
CT (150)#	62,1	6,6	8200	11,3
CT (200)#	80,4	0,9	625	12,6
CT (200)#met.	91,9	0,4	720	
CT (270)#	62,5	6,3	11200	14,1
CT (+/- 325)#	63,1	5,3	17800	17,6

Tabla 29. Granulometría L-8618 cabezas polvos Teniente

D-3 Análisis químico a Residuos de lixiviación agitada

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [%]	CuNS [%]	S [%]
CT 2	50,9	11,4	2,35	9	12,9
CT 1	44,4	12,1	5,48	10,5	10,5
CPS`1	80,3	0,58	0,24	14,4	14,4
CPS`2	79,9	0,31	0,13	16	14,7
CPS`3	80,6	0,32	0,08	15,4	15,3

Tabla 30. Análisis químico Residuo L-8594

Nombre Muestra	Cu Total [%]	Fe-total [%]	As [%]	CuNS [%]	S [%]
Tte`s [c]	49,7	6,3	2,4	26,6	14,4
CPS`S [r]	81	0,8	0,063	7,1	13,8
Tte`s [r]	56,9	7,9	1,5	12,1	14,3
CPS`S [c]	78,7	0,9	0,095	15,5	14,2

Tabla 31. Análisis químico, residuo L-8645

Nombre Muestra	As [g/l]	Cu Solución [g/l]	Fe-total [g/l]	H+ [g/l]
Tte`2	2,1	41,3	3,6	4
Tte`1	1,7	49,4	3,9	3
CPS`1	0,19	25,2	1,5	2
CPS`2	0,22	37,5	1,4	4
CPS`3	0,15	35,7	1,2	3

Tabla 32. Concentración PLS L-8594

Nombre Muestra	As [%]	Cu Solución [g/l]	Fe+3 [g/l]	Fe-total [g/l]	H+ [g/l]
PLS CPS`S	0,017	10,8	0	0,0475	4,9
PLS Tte`s	0,1065	14	0	0,094	6,8

Tabla 33. Concentración PLS L-8634

Nombre Muestra	As [ppm]	Cu Solución [g/l]	Fe+3 [ppm]	Fe-total [ppm]
CT	3900	57,8	275	2200
CPS	310	46,6	0	670

Tabla 34. Concentración PLS L-8668

D-4 Resultados experimentales lixiviación agitada Polvos CT.

Tiempo [h]	1ra prueba g/l Cu	2da prueba g/l Cu	3ra prueba g/l Cu	Promedio de pruebas g/l Cu
0	0	0	0	0
1	16,4	16,5	14,1	15,7
2	15,9	17,4	16,9	16,7
3	17,5	17,3	17,9	17,6
4	17,9	18,1	18	18
5	19,2	19,1	19,1	19,1
6	19,3	19,1	19,2	19,2

Tabla 35. Cinética de reacción, muestras de Polvos CT con ácido sulfúrico a 25°C y presión atmosférica

Tiempo [h]	1ra prueba [g/l] Cu	2da prueba [g/l] Cu	3ra prueba [g/l] Cu	Promedio de pruebas [g/l] Cu
0	0	0	0	0
1	17,5	17,3	17,3	17,4
2	17,8	18,1	18	18
3	18,3	18,5	18,5	18,4
4	19,7	19,9	20	19,9
5	20,5	20,8	20,6	20,6
6	21,5	21,5	21,6	21,5

Tabla 36. Cinética de reacción, muestras de Polvos CT con ácido sulfúrico y cloruro de sodio a 25°C y presión atmosférica

D-5 Resultados experimentales Balance de masa pruebas Iso-pH.

Nombre Muestra	Cu Total [g]	Cu Extracción [g]	Cu % de extracción [%]
Tte 1[c]	8,48	11,4	133,9
Tte 2[c]	9,52	9,5	99,8
CPS`1[c]	15,84	5,8	36,6
CPS`2[c]	15,5	8,6	55,6
CPS`3[c]	15,7	8,2	52,3

Tabla 37. Balance de masa L-8594

Nombre Muestra	Cu Total [g]	Cu Extracción [g]	Cu Solución [%]
TTE`S	50,4	14	27,8
CPS`S	78,7	10,8	13,7

Tabla 38. Cobre extraído

Nombre Muestra	Cu Total [g]	Cu Extracción [g]	Cu Solución [%]
CT [c]	37,5	29,8	79,5
CPS [c]	79,6	34,3	43,1

Tabla 39. Cobre presente en las muestras cabezas

D-6 Resultados experimentales extracción y recuperación de Cobre.

Tiempo [días]	[%] Extracción	[%] Recuperación
0	0.00	0.00
1	15.10	15.10
2	14.70	29.80
3	2.52	32.32
4	6.50	38.82
5	1.98	40.80
6	1.76	42.56
7	1.21	43.77
8	1.56	45.33
9	1.78	47.11
10	1.98	49.09
11	0.50	49.59
12	0.58	50.17
13	1.23	51.40
14	0.95	52.35
15	0.87	53.22

Tabla 40. Extracción y recuperación de Cobre columna Alfa

tiempo [días]	[%] Extracción	[%] Recuperación
0	0.00	0.00
1	15.82	15.82
2	14.27	30.09
3	6.14	36.23
4	4.87	41.10
5	4.20	45.30
6	2.50	47.80
7	2.35	50.15
8	2.97	53.12
9	1.87	54.99
10	1.20	56.19
11	1.50	57.69
12	0.78	58.47
13	1.09	59.56
14	0.26	59.82
15	0.42	60.24

Tabla 41. Extracción y recuperación de Cobre columna Beta

tiempo [días]	[%] Extracción	[%] Recuperación
0	0.00	0.00
1	27.56	27.56
2	20.80	48.36
3	2.07	50.43
4	1.70	52.13
5	1.06	53.19
6	1.12	54.31
7	0.98	55.29
8	1.50	56.79
9	0.99	57.78
10	0.97	58.75
11	0.70	59.45
12	1.00	60.45
13	0.65	61.10
14	0.25	61.35
15	0.22	61.57

Tabla 42. Extracción y recuperación de Cobre columna Gamma

Tiempo [días]	[%] Extracción	[%] Recuperación
0	0.00	0.00
1	13.56	13.56
2	17.90	31.46
3	10.35	41.81
4	4.23	46.04
5	4.22	50.26
6	2.76	53.02
7	1.98	55.00
8	1.70	56.70
9	1.36	58.06
10	1.33	59.39
11	1.09	60.48
12	1.58	62.06
13	1.47	63.53
14	1.67	65.20
15	1.33	66.53

Tabla 43. Extracción y recuperación de Cobre columna Delta

Tiempo [días]	[%] Extracción	[%] Recuperación
0	0.00	0.00
1	33.40	33.40
2	20.60	54.00
3	13.00	67.00
4	6.56	73.56
5	1.98	75.54
6	0.56	76.10
7	1.22	77.32
8	0.44	77.76
9	0.18	77.94
10	0.90	78.84
11	0.05	78.89
12	0.30	79.19
13	0.07	79.26
14	0.01	79.27
15	0.05	79.32

Tabla 44. Extracción y recuperación de Cobre columna Épsilon

Tiempo [días]	[%] Extracción	[%] Recuperación
0	0.00	0.00
1	21.07	21.07
2	19.00	40.07
3	11.45	51.52
4	6.45	57.97
5	3.99	61.96
6	5.30	67.26
7	4.87	72.13
8	2.45	74.58
9	1.00	75.58
10	0.77	76.35
11	0.24	76.59
12	0.07	76.66
13	0.05	76.71
14	0.06	76.77
15	0.80	77.57

Tabla 45. Extracción y recuperación de Cobre columna Omega

D-7 Resultados experimentales extracción y recuperación de Cobre.

	alfa	beta	gamma	delta	Épsilon	omega
0	672	704	696	707	700	696
5	668	700	692	703	696	692
10	636	694	598	612	607	629
15	654	670	620	657	674	655

Tabla 46. Potencial de las columnas durante la lixiviación

pH	Alfa	Beta	Gamma	delta	Épsilon	Omega
0	3,14	3,24	2,55	2,47	2,53	2,79
5	2,82	2,92	2,23	2,15	2,21	2,47
10	2,20	2,43	2,95	2,22	1,87	2,33
15	2,11	2,90	2,50	1,83	1,53	2,17

Tabla 47. pH de las columnas durante la lixiviación