



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
BIOTECNOLOGÍA

UTILIZACIÓN DE ESCORIAS DE FUNDICIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE
COMPUESTOS DE HIERRO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

CONSUELO ALEJANDRA SEPÚLVEDA ESTAY

PROFESOR GUÍA
JESÚS CASAS DE PRADA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LUIS CIFUENTES SEVES
ALBERT HERRERA ZEPPELIN

SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2006

*A mis padres Gladys y Alberto,
por su apoyo incondicional y
por ser los mejores.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que ayudaron a que esta memoria saliera adelante. A mi Profesor Guía, el Profe Jesús, por realmente guiarme a través de la memoria, por estar siempre disponible para ayudarme frente a todas las consultas que se me ocurrieron, y sobre todo por todo su apoyo. A los profesores de mi comisión, Profesor Luis y Profesor Leandro, por tener siempre la disponibilidad y el tiempo para apoyarme en este trabajo. A Gloria Crisóstomo, por sus consejos, por respaldarme en todos los experimentos de esta memoria y por las entretenidas conversaciones que compartimos. A don Raúl, por su ayuda y disponibilidad incondicional. A Emma, por su simpatía y por ser tan servicial. A las chicas de doctorado del laboratorio: Poldie, miles de gracias por tu constante ayuda y por tu gran espíritu docente, Carola, por aconsejarme y ayudarme cuando recién entré al laboratorio completamente perdida, y Vero por tu alegría y simpatía.

El paso a través de la Universidad no hubiera sido posible sin el gran apoyo de mi familia. Gracias a mis padres, Gladys y Alberto, por creer en mí, por apoyarme en todos esos momentos en que ya no quería saber nada más de ramos de ingeniería y por el enorme esfuerzo que han hecho para que yo pudiera terminar con mis estudios. A mis hermanos, Coni, Gonzalo, Sole, Daniel, Marcela, Flo y Dieguito por su preocupación, cariño y alegría, son la mejor familia que uno pudiera pedir.

Y como dejar de mencionar a mis queridos amigos de la Universidad, que hicieron que el paso a través de ella fuera lo mejor: Carola G., Dani, Pame y Héctor, amigos inseparables de primero, siempre estarán en mi corazón. A las químicas: Bárbara, Karlita, Katy, Tati y Mónica, por estar siempre preocupadas de mí y por todos esos momentos entretenidos que compartimos. Un enorme gracias a Brigitte, Carola C., Cecy, Hernán, Issis, Iván y Klau por ser los “verdaderos”. Tampoco puedo dejar de mencionar al departamento de ingeniería química y biotecnología y sus funcionarios, gracias a su apoyo y organización todo funciona en el departamento. A todos los chicos de la salita, por aquellos momentos que hicieron que el departamento fuera cada vez más unido. Y a mis amigas del colegio Clau M., Clau S., Dani, Barby, Caro y Tere, porque sé que siempre seremos amigas, gracias por escucharme y estar siempre ahí para mí.

El paso por la Universidad ha sido una etapa sin duda de un gran crecimiento personal y profesional, y quiero agradecer a todos los que fueron parte de ella, siempre los recordaré y estarán en mi corazón.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	3
Tabla de Contenidos	4
Índice de Ilustraciones	6
Índice de Tablas.....	7
Capítulo I	9
Introducción.....	9
1.1 La industria del cobre y la escoria	9
1.1.1 Industria y procesos de obtención del cobre.....	9
1.1.2 Origen de las escorias de fundición.....	12
1.1.3 Características de la escoria de fundición	14
1.1.4 Escoria y medio ambiente	14
1.1.5 Usos alternativos para la escoria de fundición	15
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo General	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Antecedentes sobre proceso productivo diseñado	18
1.3.1 Lixiviación.....	18
1.3.2 Cristalización.....	19
1.3.3 Precipitación.....	20
1.3.4 Usos actuales de los compuestos de hierro a obtener	21
Capítulo II.....	23
Metodología.....	23
2.1 Metodología experimental.....	23
2.1.1 Etapa de lixiviación de escoria	24
2.1.2 Etapa de cristalización de compuestos de hierro	26
2.1.2 Etapa de precipitación de compuestos de hierro	27
2.2 Diseño conceptual	28
Capítulo III	29
Resultados experimentales y análisis	29
3.1 Resultados de análisis de escoria.....	29
3.2 Resultados de lixiviación.....	31
3.3 Resultados cristalización-filtración-secado	37
3.4 Resultados precipitación-filtración-secado	40
3.5 Discusiones y conclusiones parciales de los resultados experimentales.....	48
Capítulo IV	50
Diseño Conceptual.....	50
4.1 Diagrama de procesos de diseño conceptual.....	50
4.2 Balances de masa para diseño conceptual	53
4.4 Discusiones parciales del diseño conceptual.....	57
Capítulo V	58
Discusiones Generales	58
Capítulo VI	60
Conclusiones.....	60
Capítulo VII.....	62
Bibliografía	62

Capítulo VIII	65
Anexos y Apéndices	65
8.1 Glosario	65
8.1.1 Abreviaturas usadas	65
8.2 Anexos Introducción	66
8.3 Anexos Metodología Experimental.....	67
8.4 Anexos Diseño Conceptual.....	82
8.5 Fórmulas utilizadas para cálculos.....	93

Índice de Ilustraciones

Figura 1. 1 Evolución del precio del cobre (Cochilco, 2006 ^[a])	9
Figura 1. 2 Procesos de producción de cobre dependiendo del tipo de mineral proveniente de la mina.	10
Figura 2. 1 Sistemas experimentales utilizados para la obtención de compuestos de hierro	24
Figura 2. 2 Sistema de lixiviación.....	25
Figura 2. 3 Metodología experimental para obtención de hierro cristalizado	26
Figura 2. 4 Metodología experimental para obtención de hierro precipitado	28
Figura 3. 1 Magnetita (Mg) masiva asociada a la masa vítrea.	30
Figura 3. 2 Calcosina (Cc) asociada a magnetita (Mg), ambas ocluidas en masa vítrea	30
Figura 3. 3 Distribución de tamaños de escoria cabeza.....	31
Figura 3. 4 Extracción de hierro por lixiviación natural	32
Figura 3. 5 Porcentaje extracción de hierro	33
Figura 3. 6 Cinética lixiviación hierro total.....	33
Figura 3. 7 Cinética de la lixiviación del silicio	34
Figura 3. 8 Consumo de ácido sulfúrico.....	34
Figura 3. 9 Hierro disuelto en lixiviación con ácido sulfúrico 1M	36
Figura 3. 10 Comparación hierro disuelto según concentración de ácido sulfúrico	36
Figura 3. 11 Comparación cinética de lixiviación del silicio para ambos casos de concentración de agente lixivante.	37
Figura 3. 12 Sólidos de la etapa de cristalización con solución inicial 0,1M de ácido sulfúrico ..	38
Figura 3. 13 Sólidos de la etapa de cristalización con solución inicial 1M de ácido sulfúrico	40
Figura 3. 14 Recuperación de hierro	41
Figura 3. 15 Precipitación de silicio	41
Figura 3. 16 Hierro en solución residual.	42
Figura 3. 17 Pulpas obtenidas después de la etapa de precipitación con burbujeo de nitrógeno ..	44
Figura 3. 18 Sólidos obtenidos para distintos experimentos	44
Figura 3. 19 DRX sólidos cristalizados.....	45
Figura 3. 20 Comparación entre especies presentes en sólidos de precipitación.....	48
Figura 4. 1 Diagrama de bloques de producción de sulfatos de hierro	51
Figura 4. 2 Diagrama de bloques de producción de hidróxidos de hierro.....	52
Figura 4. 3 Filtros discos disponibles en el mercado.....	55
Figura 8.2. 1 Principales productos obtenidos a partir de escoria para el área de la construcción. 66	
Figura 8.2. 2 Goethita	66
Figura 8.3. 1 Composición química de escoria utilizada en experimentos	67
Figura 8.3. 2 Grado liberación, asociación y oclusión de hierro en escoria	68
Figura 8.3. 3 Distribución granulométrica de escoria inicial.....	69
Figura 8.3. 4 Variación del flujo entrada/salida real en etapa de lixiviación.....	69
Figura 8.3. 5 Hierro disuelto en solución a la salida de etapa de lixiviación.....	70
Figura 8.3. 6 Disposición sistema experimental.....	70
Figura 8.3. 7 Consumos de NaOH en etapa de Precipitación.....	71
Figura 8.3. 8 Porcentaje de distintos elementos sólidos precipitados a distintos pH _{finales} trabajados	71

Figura 8.3. 9 Datos obtenidos en cinética de lixiviación.....	72
Figura 8.3. 10 Cálculos experimentales a partir de cinética de la Lixiviación.....	73
Figura 8.3. 11 Datos y cálculos para cristalización con solución ferrosa lixiviada 0,1M.....	74
Figura 8.3. 12 Datos y cálculos para cristalización con solución ferrosa lixiviada 1M.....	75
Figura 8.3. 13 Datos y cálculos para precipitación con solución ferrosa lixiviada 0,1M	76
Figura 8.3. 14 Resultados de DRX para sólidos pH_{final} 9.....	78
Figura 8.3. 15 Resultados de DRX para sólidos pH_{final} 11.....	79
Figura 8.3. 16 Resultados de DRX para sólidos pH_{final} 5 + oxidación de solución	80
Figura 8.3. 17 Resultados de DRX para sólidos de cristalización.....	81
Figura 8.4. 1 Diagrama de flujo de proceso productivo de sulfatos de hierro	82
Figura 8.4. 2 Balances de masa para proceso de cristalización de sulfatos de hierro, etapa lixiviación	83
Figura 8.4. 3 Balances de masa para proceso de cristalización de sulfatos de hierro, etapa cristalización, filtrado, secado	85
Figura 8.4. 4 Diagrama de flujo de proceso productivo de hidróxidos de hierro	87
Figura 8.4. 5 Balances de masa para producción de hidróxidos de hierro, etapa lixiviación.....	88
Figura 8.4. 6 Balances de masa para producción de hidróxidos de hierro, etapa precipitación, filtrado, secado	90
Figura 8.4. 7 Cálculos para pureza de cristales	92

Índice de Tablas

Tabla 1. 1 Principales Productores Mundiales de Fundiciones de Cobre	11
Tabla 1. 2 Datos industriales de la composición de la escoria	14
Tabla 3. 1 Análisis químico de escoria.....	29
Tabla 3. 2 Hierro soluble en Ácido sulfúrico	29
Tabla 3. 3 Extracción de hierro y silicio en período de pruebas de lixiviación	35
Tabla 3. 4 Recuperación de elementos por precipitación a distintos pH.....	41
Tabla 3. 5 Consumo de NaOH para cada caso de pH_{final}	41
Tabla 3. 6 Elementos en solución residual a distintos pH.....	42
Tabla 3. 7 Porcentaje sólidos en soluciones a la salida de la etapa de precipitación.....	42
Tabla 3. 8 Humedad de sólidos al inicio de etapa de secado	42
Tabla 3. 9 Recuperación de elementos con y sin oxidación de la solución.....	42
Tabla 3. 10 Consumo de NaOH con y sin oxidación de la solución.....	43
Tabla 3. 11 Elementos en solución residual con y sin oxidación de la solución.....	43
Tabla 3. 12 Porcentaje de sólidos en las soluciones a la salida de la etapa de precipitación.....	43
Tabla 3. 13 Humedad de los sólidos al inicio de etapa de secado.....	43
Tabla 3. 14 Análisis de presencia en sólido de cada uno de los compuestos.....	46
Tabla 4. 1 Balance entrada/salida proceso producción sulfatos de hierro.....	51
Tabla 4. 2 Balance entrada/salida proceso producción hidróxidos de hierro.....	52
Tabla 4. 3 Resumen de diseño de planta	57

Las escorias de fundición constituyen uno de los principales desechos sólidos en las plantas de la industria del cobre, lo cual aumenta día a día. En Chile por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor 2,2 ton de escoria, y a nivel nacional se producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas por año de escoria, existiendo a la fecha una acumulación de decenas de millones de toneladas. Esta escoria se acumula en canchas colindantes a cada planta industrial constituyéndose escoriales catalogados como pasivos ambientales, los cuales son potencialmente contaminantes si no son bien manejados. Esto genera la necesidad de poder encontrar usos alternativos a la escoria, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre.

Se trabajó con una muestra de escoria procedente de un horno de limpieza cuyo análisis principal indicó que contiene: 46,1% Fe, 27,3 %Si, entre otros elementos. El hierro está presente como 14,31% Fe_3O_4 (magnetita), 27,3% SiO_2 (sílice), entre otros. El gran contenido de hierro observado en la muestra de escoria analizada y su potencial recuperación motiva el tema de este trabajo, fijándose como objetivo principal la producción de compuestos de hierro a través de la lixiviación-cristalización ácida de sulfato de hierro y lixiviación-precipitación alcalina de oxi-hidróxido de hierro. Para ello se llevó a cabo el diseño conceptual de ambos procesos industriales y la determinación de los principales parámetros a través de la realización de pruebas metalúrgicas a escala de laboratorio y temperatura ambiente.

Los principales resultados de este estudio fueron los siguientes:

Primero se realizó la etapa de lixiviación de la escoria en una mini-columna utilizando una solución acuosa de ácido sulfúrico, en dos condiciones 0,1 y 1 M, por un período de 9 días, para posteriormente sintetizar cada compuesto de hierro definido. El consumo de ácido en la etapa de lixiviación fue de 5,4kg/ton y 11 kg/ton de escoria, para las condiciones lixiviantes de 0,1 y 1 M de H_2SO_4 . El hierro se disolvió principalmente como sulfato ferroso.

A través de la cristalización se produjo 1,68 kg Fe/m^3 de solución tratada. El sólido sintetizado correspondió a una mezcla de sulfatos de hierro, constituyendo un producto grado técnico con pureza estimada en 81%. El análisis de este producto fue 21,1% Fe, 17,37% S, 1,13% Si, entre otros elementos menores. La humedad de este producto fue 10%. Los compuestos principales identificados mediante DRX en este producto fueron distintos tipos de sulfatos hidratados, principalmente melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y szomohokita ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

La precipitación de compuestos de Fe produjo 0,92 kg Fe/m^3 de solución tratada. El sólido sintetizado correspondió a una mezcla de oxi-hidróxidos de hierro, constituyendo un producto grado técnico. Mediante análisis químico se obtuvo que el producto tenía 19,4% Fe, 3,7% S, 5% Si, entre otros elementos menores. La humedad de este producto fue 93%. El sólido final correspondió a una mezcla de varios compuestos, donde el principal identificado mediante DRX fue la natrojarosita ($\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$).

A través de un diseño conceptual de plantas a nivel industrial para la producción de cada uno de los compuestos finales se obtuvo que, para producir 1 t/d de sulfatos de hierro se requieren 600 $\text{m}^3/\text{día}$ de PLS, y trabajar un cristalizador de 45 m^3 . Por otro lado para producir 1 t/d de hidróxidos de hierro al día es necesario tratar 1200 $\text{m}^3/\text{día}$ de PLS, y trabajar con precipitadores de 68 m^3 . Ambos procesos estudiados resultaron ser técnicamente factibles, y se recomienda realizar estudios a mayor escala para evaluar su factibilidad.

Capítulo I

Introducción

1.1 La industria del cobre y la escoria

1.1.1 Industria y procesos de obtención del cobre

La industria del cobre es actualmente uno de los pilares fundamentales de la economía de Chile. En los últimos años se ha observado un aumento considerable en el precio del cobre, como se presenta en la Figura 1.1, generando un gran incentivo por aumentar la producción de este metal, tanto a nivel nacional como internacional.



Figura 1.1 Evolución del precio del cobre (Cochilco, 2006 ^[a])

El mineral de cobre se puede encontrar en la naturaleza en dos estados, de forma sulfurada u oxidada. Dentro de la industria del cobre existen dos formas de procesar dicho mineral proveniente de la mina para obtener los cátodos con una pureza de 99,99% requeridos en el mercado, y el proceso utilizado depende directamente de el tipo de mineral que se quiera procesar.

Los minerales sulfurados son extraídos de la mina, pasan a una etapa de conminución¹, posteriormente a una concentración de minerales, fundición de los mismos y finalmente a una etapa de electro-refinación para obtener los cátodos deseados. La etapa de fundición mencionada también es conocida como piro-metalurgia, por trabajar con hornos a altas temperaturas.

Por otro lado los minerales oxidados son extraídos de la mina, son procesados en una etapa de conminución y posteriormente pasan a una etapa que lixiviación y extracción por solventes, para

¹ Conminución: Proceso de reducción de tamaño de minerales que permite liberar las especies valiosas contenidas en ellos.

finalmente, a través de una etapa de electro-obtención, producir los cátodos comercializados en el mercado. Cada una de las etapas recién descritas para los distintos minerales procesados se puede observar en la Figura 1.2.

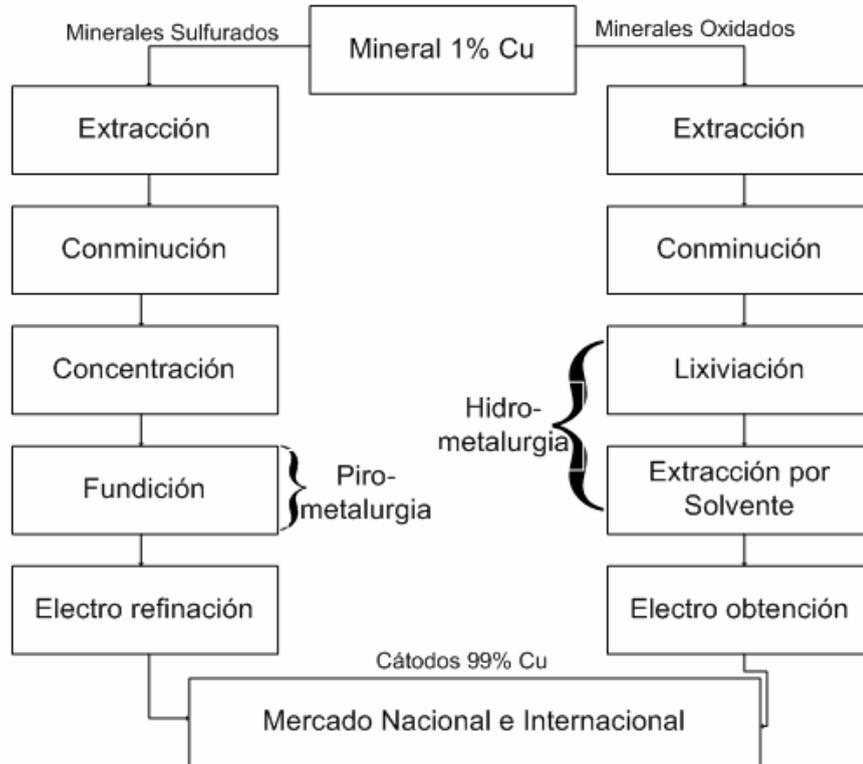


Figura 1. 2 Procesos de producción de cobre dependiendo del tipo de mineral proveniente de la mina.

La piro-metalurgia es una etapa de una de las dos ramas de la metalurgia, en que la obtención y refinación de minerales es por medio de la utilización de calor, por lo que también es conocida como producción por fundición. El concentrado de cobre proveniente de las plantas concentradoras es convertido a través de la piro-metalurgia y posterior electro refinación en los cátodos de cobre comercializados en el mercado. Chile es uno de los principales productores a nivel mundial de cobre a partir de minerales sulfurados y por lo tanto utilizando una etapa de piro-metalurgia, tal como se puede observar en la Tabla 1.1, donde la participación actual de Chile en el mercado actual se encuentra en torno a un 14%, y una proyección de producción de cobre al año 2012 en relación a la producción mundial muestra que la participación estará en torno al 13,8% , implicando que la producción de cátodos de cobre a partir de minerales sulfurados se mantendrá firme en los siguientes años.

Tabla 1. 1 Principales Productores Mundiales de Fundiciones de Cobre
(kt fino/año) (Cochilco, 2006 ^[b])

País	2004	Participación % 2004	2012 (e)	Variación 2004-2012	Participación % 2012
China	1.458	12,6	3.198	1.74	20,3
Chile	1.615	14,0	2.17	555	13,8
Japón	1.352	11,7	1.538	186	9,8
India	450	3,9	834	384	5,3
Fed. Rusa	669	5,8	746	77	4,7
Australia	410	3,6	648	238	4,1
EE.UU.	554	4,8	640	86	4,0
Polonia	540	4,7	550	10	3,5
Brasil	189	1,6	480	291	3,0
Canadá	449	3,9	465	16	3,0
Kazajstán	440	3,8	450	10	2,9
Zambia	312	2,7	438	126	2,8
Perú	393	3,4	424	31	2,7
Corea del Sur	420	3,6	420	0	2,7
Alemania	315	2,7	320	5	2,0
Otros	1.982	17,3	2.26	444	15,4
Total Mundial	11.548	100,0	15.747	4.199	100,0

El tratamiento de minerales sulfurados, especialmente la ruta piro-metalurgia o etapas de fundición dentro de ésta, posee un particular interés para el presente estudio, por lo que se analizará con más detalle.

El proceso de obtención de cátodos a partir de minerales sulfurados posee una serie de etapas consecutivas que permiten la obtención del cobre comercializado. Las etapas que la conforman se pueden observar en la Figura 1.3, donde se puede observar claramente que a través del calor, utilizando diversos hornos y convertidores^{II}, es posible llegar a los productos finales deseados.

^{II} Proceso de fusión conversión basado en los fenómenos físico-químicos de inmiscibilidad en fase líquida.

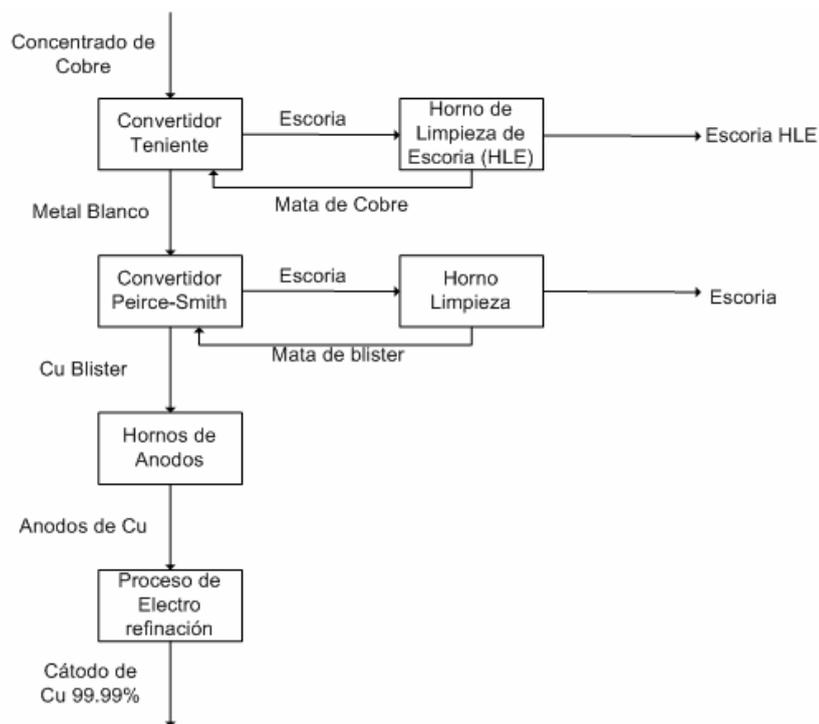


Figura 1.3 Diagrama de bloques de procesamiento minerales sulfurados

De la misma Figura 1.3 se puede observar que dentro de este proceso se obtienen una serie de desechos que perjudican el medio ambiente, ya sean gaseosos, líquidos o sólidos, residuos que están siendo continuamente controlados por las autoridades. Los desechos de principal interés para este estudio son los residuos sólidos, también denominados escorias. Dentro de las escorias generadas por la ruta piro-metalurgia existen diversos tipos, dependiendo de la etapa en la cual fueron descartadas, y lo que influirá, a su vez, en la composición final de dicha escoria. La escoria proveniente del horno de limpieza de escoria (HLE) es aquella que será estudiada a través del presente trabajo, debido a que se trabajó con muestras de escoria de este tipo y, debido a que ha sido limpiada, posee una mayor cantidad de elementos distintos al cobre que podrían ser recuperados.

1.1.2 Origen de las escorias de fundición

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho a partir del proceso piro-metalúrgico. Durante la fundición del mineral concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se pueden clasificar como: mata rica en cobre (sulfuro) y la escoria (óxido). La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas. En las etapas de recuperación de cobre en hornos de limpieza y HLE es posible recuperar el cobre contenido en escorias de alta ley, las que se encuentran entre el 4 – 10% de cobre, que provienen de los procesos de fusión (horno) o conversión.

Actualmente Chile se usan tres procesos para el tratamiento de escorias para obtener una escoria con una ley lo más baja posible de cobre. Estos procesos son:

- a) Hornos eléctricos
- b) Plantas de flotación

c) Hornos de limpieza tipo Teniente u hornos HLE

Siendo el último el que presenta un particular interés para el presente trabajo, pues se utilizó escorias provenientes de este proceso de limpieza.

Los hornos eléctricos y los tipos Teniente son esencialmente el mismo proceso, pues se busca lograr la reducción del contenido de magnetita (Fe_3O_4) en la escoria. Esto se realiza a través de un agente sólido, líquido o gaseoso (carbono, hidrógeno y algo de azufre), así cambiando las características químicas y físicas de la escoria. Posteriormente esta mezcla se deja sedimentar, obteniendo así una fase rica en cobre (50-70%) que es devuelta a los convertidores y una escoria de descarte que es llevada a botaderos (0,7-1%).

El horno de tratamiento de escoria posee las siguientes etapas:

- 1) Carga del horno
- 2) Reducción de la magnetita: esta etapa se traduce en una disminución de la viscosidad de la escoria, permitiendo así la separación de las fases contenidas en la escoria. Para lograr esta separación se trabaja con hornos a temperaturas superiores a los 1200 °C, y debido a que las reacciones involucradas en esta etapa son endotérmicas, es necesario generar calor mediante quemadores.
- 3) Sedimentación: esta etapa es necesaria para separar las distintas fases que se producen en la limpieza de la escoria, y es posible pues las partículas con contenido sulfuro-metálico poseen mayor densidad que la escoria. Durante esta etapa es necesario mantener la temperatura del horno, y el tiempo de sedimentación varía entre los 30 y 60 minutos.

El tamaño de los botaderos de escoria va creciendo año a año, por lo que el tema de la reutilización de escorias se ha convertido en un punto de gran interés para las empresas metalúrgicas. Anualmente las fundiciones de cobre del país producen cerca de 4,5 millones de toneladas de desechos, cuyo único destino posible son los depósitos que se sitúan cerca de las plantas. Estudios realizados por diversas universidades nacionales han determinado que por cada tonelada de cobre producido se generan aproximadamente 2,2 toneladas de escoria, y que tan sólo la División del Teniente, Codelco, produce cerca de 700.000 toneladas de escoria al año. Se estima que Chile posee un volumen histórico acumulado de aproximadamente 50 millones de toneladas. (U. De Concepción, 2003)

Entre las principales empresas a nivel nacional productoras de escoria de cobre se encuentran las fundiciones de Codelco (Chuquicamata, Potrerillos, Ventanas, Paipote y Caletones), de Angloamerican Chile (Chagres) y de Falconbridge (Altomorte).

1.1.3 Características de la escoria de fundición

La escoria se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso piro-metalúrgico. Depende de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de operación y de otros diversos factores. Los óxidos fundamentales que se presentan en la escoria son:

- Óxidos de hierro (FeO , Fe_3O_4) de 30 – 40 %
- Óxidos de silicio (SiO_2) de 35 – 40 %
- Óxidos de aluminio (Al_2O_3) hasta 10 %
- Óxido de calcio (CaO) hasta 10 %

De la literatura se ha podido obtener que las escorias están compuestas por diversos elementos, como se presenta en la Tabla 1.2, y que dicha composición dependerá directamente del proceso de donde sea descargada. Los valores presentados en la Tabla 1.2 corresponden a procesos extranjeros, siendo los valores proporcionales a los de procesos chilenos.

Tabla 1. 2 Datos industriales de la composición de la escoria

	Hitashi	Naoshima	Harjavalta
Origen de la escoria	Escoria del convertidor	Escoria del convertidor	Escoria del horno de fundición instantánea
Composición de la escoria			
%Cu	4,0	3,0	1,0-1,5
% SiO_2	20,0	19,0	29,0
%Fe	46,0	49,4	44,0
% Fe_3O_4	20,0	25,0	13,0

(Biswas y Davenport, 1993)

Como se observa de la Tabla 1.2, la escoria de fundición posee una serie de compuestos de importancia industrial, que si pudieran ser recuperados, podrían tener un interés económico considerable. Uno de los elementos que se encuentra en la escoria en mayor porcentaje es el hierro, que es de gran importancia para la industria siderúrgica. El hierro es un recurso no renovable, por lo que continuamente las empresas de extracción de ese rubro están buscando alternativas de obtención de este mineral, lo que significaría que su recuperación de escorias de fundición generaría un importante aporte para dichas empresas.

1.1.4 Escoria y medio ambiente

La CONAMA define escoria como una mezcla de óxidos de hierro y silicatos u otros compuestos producidos durante el proceso de fusión y conversión de concentrados sulfurados, que no se realimenten directamente a ninguna operación unitaria considerada en la fuente emisora y que es descartada para su disposición final en botaderos o para su posterior tratamiento en una unidad de procesamiento de minerales.

En cuanto a las legislaciones existentes para la emisión de residuos sólidos mineros, se puede decir que se trata en términos generales lo concerniente a residuos sólidos en la Ley N° 19.300, sobre bases generales del medio ambiente (LBGMA), sin establecer una normativa específica. Esto se debe a que no establece una definición de alcance general de lo que se entiende por residuo. El código sanitario, que data de 1967, ha señalado que es necesario elaborar reglamentos

que fijen las condiciones de saneamiento y seguridad relativas a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios.

Los residuos mineros son los que cuentan con una mayor cantidad de normas y permisos específicos, donde los que son de directa importancia para el presente trabajo son aquellos permisos relacionados con los depósitos de botaderos. Este permiso está descrito en el artículo 86 del SEIA^{III}, el que alude al artículo 318 del D.S. N°72/85 del Ministerio de Minería, reglamento de seguridad minera y los permisos para evacuar, tratar o disponer residuos industriales, descrito en el artículo 91 del SEIA, el que alude al artículo 71 letra b) del Código Sanitario, construcción, modificación y ampliación de cualquier obra destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de residuos industriales o mineros. (Cochilco, 2004)

A pesar de que existen legislaciones que regulan el almacenamiento adecuado de las escorias de fundición posterior a su procesamiento, estas legislaciones no contemplan la revaloración, recuperación, reutilización ni reciclaje de las escorias, lo que contribuiría a la descontaminación del medio ambiente.

1.1.5 Usos alternativos para la escoria de fundición

Hasta el momento, la reutilización de escorias de fundición de cobre ha sido mínima, pero, debido a que es una preocupación latente tanto para el gobierno como para la industria minera debido al impacto medioambiental que esta produciendo, se han ido creando diversos usos alternativos de la escoria para reducir el tamaño de los botaderos existentes hoy en día.

A nivel mundial existen una serie de usos para la escoria de fundición del cobre, siendo las principales:

- *Balasto*: más bien conocido como relleno en las líneas férreas, se usa para formar una cama en las mismas, haciéndola firme y sólida. También es utilizado como lastre en los barcos, donde lastre es cualquier material usado para estabilizar un barco. La escoria es depositada en el fondo del barco para hundirlo un poco más en el agua, y así evitar volcamientos.
- *Arena abrasiva*: permite remover la pintura, capas externas y corrosión de estructuras industriales. Esto se realiza mediante una fuerza mecánica que impulsa las partículas abrasivas contra de una superficie metálica o no metálica de una estructura o producto, así removiendo contaminantes o condicionando la superficie para un tratamiento posterior. En inglés esta aplicación es conocida como *Sand Blasting*. La empresa NST Centre plantea que el poder abrasivo de la escoria del cobre es usada principalmente para remover fácilmente los contaminantes de superficies de estructuras. La escoria viene con forma cúbica, y por lo tanto con sus lados bastante afilados, generando un mejor poder abrasivo. Estos productos abrasivos a su vez generan una baja cantidad de polvo. Además su uso no genera problemas a la salud para las personas.

^{III} SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

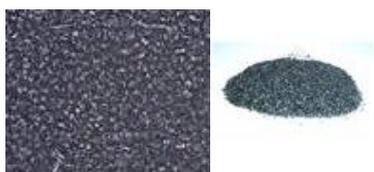


Figura 1. 4 Escoria de cobre arena abrasiva

- *EbonyGrit*: Producto creado por la empresa Opta Minerals Inc., obteniéndose como un producto secundario de la escoria proveniente de la industria del cobre. El Ebonygrit es una arena abrasiva compuesta generalmente por ferro-silicatos (Fe_2SiO_4) y óxidos, y se forma cuando la escoria fundida es enfriada bruscamente en agua. El proceso de enfriamiento rompe la escoria en partículas angulosas, haciendo que sea un producto abrasivo ideal. (Opta Minerals Inc., 2006)
- *Material de construcción*: existen diversos estudios que buscan la reutilización de la escoria en materiales de construcción, especialmente como aditivo para cementos, reemplazando en cierta manera las puzolanas y yeso, sirviendo para el mejoramiento en la tecnología de la construcción de carreteras (Wang y Emery, 2004). Existen estudios realizados para utilizar la escoria de fundición como material para el mejoramiento de la tecnología utilizada en las carreteras, estudios en los cuales se menciona que es necesario hacer un tratamiento previo de la escoria para luego poder ser agregada a distintos productos de la construcción. En Anexos Figura 8.2.1 se pueden observar todos los subproductos que se obtienen a partir de escoria de fundición para el área de la construcción, especificando todas las áreas donde actualmente se utiliza dicho desecho de la minería.
- *Obtención y recuperación de metales valiosos a partir de la escoria*: Actualmente existen una serie de estudios que buscan reciclar la escoria de diversos procesos a través de la recuperación de metales que se encuentran en su composición, y que hasta el momento no son recuperados. Entre estos procesos se puede encontrar la recuperación de cobalto, níquel, molibdeno y compuestos de hierro, entre otros, generando una posibilidad económica y de mejoramiento ambiental considerable. Investigaciones realizadas por CONICYT han permitido estudiar la lixiviación de escorias con ácido sulfúrico para la recuperación de cobre (Cu) y molibdeno (Mo). En dichos estudios se observó que la cinética de lixiviación del hierro es equivalente e, incluso superior, a la de Cu y Mo, incluso se planteó que podría estar influyendo en la lixiviación del cobre al oxidarse desde Fe(II) a Fe(III) en la solución. Por lo tanto, debido a la alta concentración de hierro en la escoria, es inevitable su lixiviación junto con el cobre y el molibdeno. De acuerdo a estos primeros resultados, sobre el 98% del consumo de ácido está asociado a la disolución del hierro para una escoria con 0,8% de Cu y 0,3% de Mo. (CONYCYT, 2005)

1.2 Objetivos

La gran disponibilidad de escoria de descarte de las fundiciones de cobre nacionales ha generado una gran problemática ambiental, creando la necesidad de buscar usos alternativos de este material, principal fin perseguido por el presente trabajo.

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de título es realizar el diseño conceptual de un proceso de producción de compuestos de hierro a partir de escorias de fundición.

1.2.2 Objetivos Específicos

- **Objetivos experimentales:**
 - Determinación de cinéticas de las etapas que se utilizarán para la separación de los compuestos de hierro:
 1. Lixiviación de la escoria con ácido sulfúrico en columnas de lixiviación a escala de laboratorio.
 2. Cristalización de las soluciones obtenidas de la etapa de lixiviación vía saturación con ácido sulfúrico (H_2SO_4), para así obtener compuestos sólidos de hierro (cristales) en la forma de sulfatos de hierro.
 3. Precipitación con hidróxido de sodio (NaOH) de las soluciones obtenidas por lixiviación, así obteniendo otro tipo de sólidos de hierro, en la forma de hidróxidos de hierro, ya sean hidróxidos ferrosos o hidróxidos férricos.
- **Objetivos del diseño conceptual:**
 - Definición de diagramas de flujos para procesos a una escala comercial, planteados a partir de los datos experimentales.
 - Elaboración de balances de metalúrgicos en cada una de las etapas del proceso de recuperación de compuestos de hierro diseñadas.
 - Descripción y comparación entre alternativas de procesamiento planteadas.

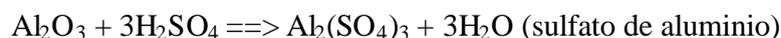
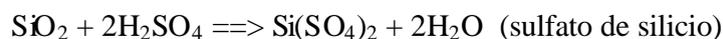
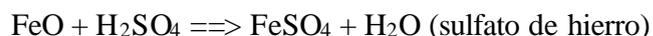
1.3 Antecedentes sobre proceso productivo diseñado

Los procesos que se utilizarán en la presente memoria se describirán a continuación, para tener una mejor comprensión de ellos al usarlos en la parte experimental.

1.3.1 Lixiviación

La lixiviación de minerales es uno de los principales procesos usados hoy en día en la hidrometalurgia. Consiste en la disolución selectiva de los constituyentes de un mineral en una solución, a través de una reacción entre la solución lixivante (agente) y el sólido que se quiere lixiviar, disolviendo la sustancia o mineral de interés, y posteriormente un transporte de materia. Este fenómeno de disolución selectiva se debe a que muchos metales pueden formar sales solubles en medios acuosos, y también es necesario recordar que los óxidos son sensibles a los ataques de soluciones ácidas, y, como se mencionó anteriormente, la escoria está formada principalmente por los óxidos que se producen durante el proceso piro-metalúrgico.

Basándose en lo anterior, se pueden plantear las reacciones químicas de los principales óxidos de la escoria con un agente lixivante ácido, como el ácido sulfúrico (H_2SO_4). Es necesario considerar que esta es escoria proviene del HLE, por lo que su contenido de magnetita es mínimo. Además solamente se considerarán las reacciones de los principales compuestos que se encuentran dentro de la escoria.



Dentro de la lixiviación ocurren una serie de fenómenos sucesivos que permiten recuperar el mineral de interés, entre los cuales se pueden encontrar:

- 1) Contacto inicial entre el agente lixivante y los minerales de interés.
- 2) Reacciones químicas complejas entre el agente lixivante y los minerales de sólido.
- 3) Transferencia de masa entre el mineral y el agente lixivante.
- 4) Transporte de masa hacia la solución lixiviada final.

La recuperación de los minerales de el sólido mediante lixiviación puede ser representada por dos modelos distintos, donde se describe en detalle la reacción que ocurre entre el agente lixivante y el mineral, tal como se describe en la siguiente reacción.



Los modelos que describen la lixiviación son:

1.3.1.1 Modelo de conversión progresiva

Considera que el agente lixiviante entra en contacto con la partícula de mineral sólida y reacciona con toda dicha partícula en todo instante, generando diferentes velocidades de reacción en los distintos lugares del mineral. Así, todas las especies mineralógicas presentes en el sólido reaccionan continuamente y de forma progresiva.

1.3.1.2 Modelo de núcleo sin reaccionar

Considera que la reacción ocurre inicialmente en la superficie externa de la partícula sólida de mineral, así formándose una zona superficial de reacción, que se va moviendo hacia el centro del sólido a medida que las reacciones van ocurriendo. Esto generará que exista en cualquier instante una zona reaccionada porosa de material, zona que irá creciendo a medida que siga ocurriendo la lixiviación del mineral, hasta que este mineral haya reaccionado completamente. Así se puede decir que el tamaño del mineral va reduciéndose a medida que avanza la lixiviación del mineral. (Silva, 1999)

1.3.2 Cristalización

La cristalización es un proceso físico-químico en el cual se van formando compuestos sólidos a partir de una solución inicial (en el caso del presente trabajo es la solución proveniente de la etapa de lixiviación) que se va saturando con una segunda solución distinta a la inicial (en este caso ácido sulfúrico). Esta saturación permite la síntesis de cristales, y su formación depende principalmente del tipo de solvente que se utilice, la temperatura, presión de trabajo, la velocidad de agitación y la acidez libre en el medio ácido.

La formación de cristales requiere de una serie de etapas consecutivas que permitan la visualización final del sólido, etapas que se describen a continuación.

1.3.2.1 Etapa de sobre saturación de la solución

Se ha podido observar que un compuesto sólido se puede formar por cristalización desde una solución acuosa cuando se excede el límite de solubilidad en las condiciones de concentración de solutos y de temperatura a las que se encuentra. Esto se debe a que la sobre saturación genera que la solubilidad de los sólidos vaya disminuyendo.

1.3.2.2 Etapa de nucleación de cristales

Posterior a la sobresaturación de la solución, es necesario contar con pequeñas partículas que actúen como núcleos o semillas, en torno a las cuales los sólidos puedan comenzar a crecer. Existen casos en que no es necesario utilizar semillas, sino que la solución sobresaturada genera cristales a medida que aumenta el tiempo de reacción.

La etapa de nucleación se puede dividir en mecanismos primarios y secundarios, y, a su vez, la nucleación primaria puede desarrollarse tanto de forma homogénea como heterogénea.

La nucleación primaria homogénea y su mecanismo exacto es aún desconocido, pues se basa en la formación de sólidos a partir de una solución sobresaturada sin la presencia de partículas extrañas, donde los sólidos formados deben coagular y a su vez resistir la tendencia a la resolución.

Por otro lado la nucleación primaria heterogénea se lleva a cabo gracias a la presencia de partículas extrañas a la solución sobresaturada. Este tipo de cristalización ocurre comúnmente.

La nucleación secundaria es generalmente heterogénea, pues la solución que se encuentra sobresaturada es inoculada con partículas del material del cual se buscan cristales. Así se mantiene el control sobre las características finales de los cristales obtenidos, especialmente relacionado con el tamaño de los cristales finales.

1.3.2.3 Etapa de crecimiento de los cristales

La etapa final de la cristalización consiste en el crecimiento de los cristales. Aquí cada núcleo comienza a crecer y se empiezan a observar cristales en la solución. La forma de los cristales depende de su hábito cristalino, es decir, la apariencia externa de los cristales o el tamaño relativo de las caras del cristal, hábito que es el resultado de las diferentes velocidades de crecimiento de las caras del cristal, y que finalmente da las principales propiedades del cristal, pues cristales con hábitos muy alargados y delgados son más frágiles que aquellos con hábitos más grandes.

1.3.3 Precipitación

La precipitación es un proceso físico-químico en el cual minerales disueltos, en general iones, se transforman en sólidos insolubles mediante la reacción con alguna sustancia química. Si los sólidos formados son menos densos que el solvente, estos pueden quedar flotando en dicho solvente formando una solución. También los sólidos formados pueden sedimentar al fondo de la solución gracias a la acción de la gravedad y si son más densos que el solvente.

La presencia de sólidos insolubles facilita una posterior separación de la solución y los sólidos vía filtración o coagulación-floculación-sedimentación y así rescatar el compuesto final deseado. El proceso requiere un ajuste del pH para cambiar el equilibrio químico a un punto donde no se favorezca más la solubilidad.

Con frecuencia los metales son precipitados con soluciones como hidróxidos, sulfuros o carbonatos, siendo los sulfuros metálicos menos solubles que los hidróxidos metálicos. (CNPMLTA, Colombia). La precipitación con soluciones de hidróxidos es comúnmente conocida como precipitación por pH. La efectividad de la precipitación dependerá de una serie de factores, entre los cuales se encuentran el tipo y concentración del ion metálico presente en la solución, la solución usada como agente de precipitación, las condiciones de reacción, en especial el pH en el que se está trabajando, y la presencia de otros compuestos que puedan inhibir las reacciones de precipitación.

Cada metal disuelto tiene un pH específico donde ocurre su precipitación con hidróxidos. Los hidróxidos metálicos son anfóteros^{IV}, lo que significa que son solubles tanto a valores muy altos y bajos de pH. Esto significa que el pH óptimo para la precipitación de un metal puede causar que otro metal se disuelva, o comience a disolverse nuevamente.

Una etapa importante dentro de la precipitación es la nucleación de sólido. La creación de una partícula hipotética incluye la formación de una interfase, la cual requiere energía basada en la energía superficial relativa del sólido y la solución. Si esta energía no está disponible, ocurre sobresaturación de la solución pero no se forman sólidos dentro de dicha solución.

1.3.4 Usos actuales de los compuestos de hierro a obtener

Actualmente existe un mercado importante para los compuestos de hierro, y especialmente para los compuestos de hierro que se busca obtener a través de este trabajo, que son compuestos de hierro en la forma de sulfatos y de hidróxidos. Por lo tanto estos compuestos serán considerados como subproductos de la escoria.

Hoy en día los sulfatos de hierro se pueden obtener en el mercado de dos formas distintas, como sulfato férrico o sulfato de hierro (III) y también como sulfato ferroso o sulfato de hierro (II). Ambos tienen aplicaciones parecidas, pero se detallan separadamente a continuación.

El sulfato ferroso es un cristal monoclinico de color verde azulado soluble en agua. Se puede encontrar en varios estados de hidratación ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, entre otros). A los 90 °C pierde el agua de su estado hidratado generando una molécula monohidratada en la forma de un polvo blanco. Es utilizado para la preparación de tintas, especialmente para teñir lanas, y también se utiliza en la purificación de aguas, como coagulante o floculante, actuando como sustituto del sulfato de aluminio, pero debe ser utilizado junto con cal (CaO) o cloro para que la coagulación llevada a cabo sea efectiva, siendo las reacciones favorecidas a pH altos. En el campo de la agricultura se utilizan como fertilizantes, pues aporta a los cultivos grandes cantidades de nutrientes y ayuda a la reducción del pH, tanto de la materia orgánica como del suelo, lo cual permite mejorar la estructura de los suelos favoreciendo de ese modo la producción agrícola. (Química Universal, 2004).

El sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) es una sal cristalina, soluble en agua y de color amarillento, que también se puede encontrar en varios estados de hidratación, siendo la más importante la sal $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, pues ocurre de forma natural en el medio ambiente y es conocida como coquimbita. Es utilizado como un coagulante para la remoción de color en la industria de la tintura, como un coagulante en la industria del tratamiento de aguas tanto potables como aguas de desecho por sus características de poder coagular tanto metales pesados como la turbiedad del agua. También es utilizado en aplicaciones de control de sulfuro de hidrógeno (H_2S) para reducir olores y corrosión (Kemiron Companies Inc., 2006) Finalmente se utiliza para la lixiviación indirecta (en ausencia de oxígeno y bacterias) de metales, pues es un oxidante fuerte capaz de disolver una gran gama de minerales sulfurados, dentro de los cuales se encuentra el cobre.

^{IV} Anfóteros: sustancia que se puede comportar tanto como un ácido o como una base dependiendo de los otros reactivos presentes.

Los hidróxidos de hierro se pueden encontrar en el mercado en la forma de hidróxido de hierro (II) $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ e hidróxido de hierro (III) $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ y tienen diversas aplicaciones dentro de la industria. En general se usan en la preparación de pinturas para proteger el hierro y la madera y, como presentan gran adsorción superficial, se emplean para la depuración de aguas y para la eliminación de gases sulfhídricos del aire (Universidad de Valladolid, 2006). Usos específicos de cada uno de los compuestos se presentan a continuación.

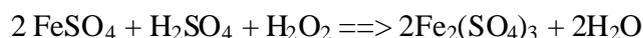
Los hidróxidos de hierro(II) son compuestos insolubles en agua que también son utilizados para la reducción de iones presentes en sistema acuosos, reduciendo iones tales como la selenita y selenato (SeO_4^{2-}) a su estado elemental de selenio, haciéndola insoluble para que precipite.

Por otro lado los hidróxidos de hierro (III) también se utilizan en radioquímica para concentrar los actínidos mediante co-precipitación (Wikipedia, 2006).

1.3.4.1 Métodos de síntesis existente para sulfatos de hierro

Sulfato Ferroso: su preparación comercial es en general a través de la oxidación de pirita o tratando hierro con ácido sulfúrico. Este último método de preparación comercial se debe a que en las etapas finales de la producción de planchas de hierro, estas son sometidas a ataques de ácido sulfúrico, produciéndose grandes cantidades de sulfato ferroso como desechos.

Sulfato férrico: se sintetiza a partir de la oxidación del sulfato ferroso con oxígeno en ambiente de ácido sulfúrico:



1.3.4.2 Métodos de síntesis existente para hidróxidos de hierro (II) y (III)

Los hidróxidos de hierro (II) se producen al reaccionar iones de hierro (II), que se encuentren en algún compuesto (ejemplo sulfato de hierro (II)), con algún tipo de hidróxido. Los métodos de síntesis ocupados en la industria para los hidróxidos de hierro no son de conocimiento abierto, pues cada empresa utiliza el método que considere más adecuado. Es por eso que no fue posible encontrar el detalle de información relacionada con los distintos métodos de síntesis de hidróxidos de hierro.

Es necesario mencionar que en la literatura existe un tercer tipo de compuesto que está clasificado como hidróxido: el óxido-hidróxido de hierro (III) $[\text{FeOOH}]$. Este compuesto se encuentra en estado natural como goethita, limonita y lepidocrocita^V. El color de este compuesto puede variar entre el amarillo, pasado por el café hasta colores café muy oscuro. Es utilizado como pigmento para cosméticos y tatuajes. En la Figura 8.1.2 de Anexos se puede observar el mineral de la goethita y las características físicas a las que se hace referencia.

^V Lepidocrocita: es un polimorfo de la goethita, donde polimorfo significa que tiene varias formas. En el caso de la goethita y la lepidocrocita ambas tienen como fórmula FeO-OH y difieren entre sí en la forma de unirse los octaedros Fe-O-OH . Se forman, en condiciones de oxidación, como productos de la alteración de minerales que contienen hierro; por ello son minerales accidentales en casi todas las rocas y en la totalidad de los suelos. (Universidad Politécnica de Madrid, 2006)

Capítulo II

Metodología

La metodología utilizada en este trabajo se dividió en dos partes, experimental y de diseño conceptual. La metodología experimental permitió diseñar a nivel de laboratorio las diversas etapas que se implementarían para poder extraer compuestos de hierro a partir de la escoria de fundición, y así poder obtener valores reales de las cinéticas de cada una de las etapas involucradas y seleccionadas en el proceso. Posteriormente con los valores obtenidos en la parte experimental se realizó el diseño conceptual, donde se buscó poder llevar este proceso a una escala industrial, realizando balances de masa para cada una de las etapas y ver su factibilidad técnica en la industria.

2.1 Metodología experimental

En la metodología experimental se busca obtener, a partir de experiencias a escala de laboratorio, las propiedades de la escoria analizada y su comportamiento frente al circuito estudiado. Por lo tanto, las distintas etapas que se deberán realizar son:

- a. Caracterización de la escoria cabeza a través de un análisis químico para los diversos compuestos de interés (Fe, S, Si), un análisis en microscopio óptico y una distribución de tamaños (análisis granulométrico).
- b. Realización de pruebas cinéticas de lixiviación con ácido sulfúrico de la escoria en columnas escala de laboratorio, para obtener soluciones con hierro disuelto.
- c. Caracterización de las soluciones obtenidas de la etapa de lixiviación, analizando cada uno de los compuestos presentes en dicha solución (Fe(II) y Fe(III) entre otros). A la vez se buscará cuantificar la variación de pH, Eh y acidez libre.
- d. Realización de pruebas de cristalización de compuestos de hierro en reactores a escala de laboratorio, mediante la técnica de saturación de la solución obtenida vía lixiviación con ácido sulfúrico.
- e. Caracterización de los compuestos de hierro sintetizados y las soluciones finales obtenidas por cristalización, realizando análisis químico (Fe, S, Si) a cada una de las muestras obtenidas.
- f. Realización de pruebas de precipitación de compuestos de hierro en reactores a escala de laboratorio, precipitación química que se hará con hidróxido de sodio (NaOH) sobre la solución obtenida de la etapa de lixiviación. Esta precipitación se realizó hasta distintos pH finales de la solución de lixiviación, permitiendo así poder comparar las mejores condiciones para obtener compuestos de hierro.
- g. Caracterización de los compuestos sólidos y soluciones obtenidas por precipitación, a través de análisis químico (Fe, Si, S) y Difracción por Rayos X, analizando las características de los compuestos finales de hierro obtenidos.

Por lo tanto el sistema experimental diseñado se puede resumir en la Figura 2.1, donde se puede observar que para la obtención de sulfatos de hierro como hidróxidos de hierro se utilizó solución proveniente de una etapa de lixiviación

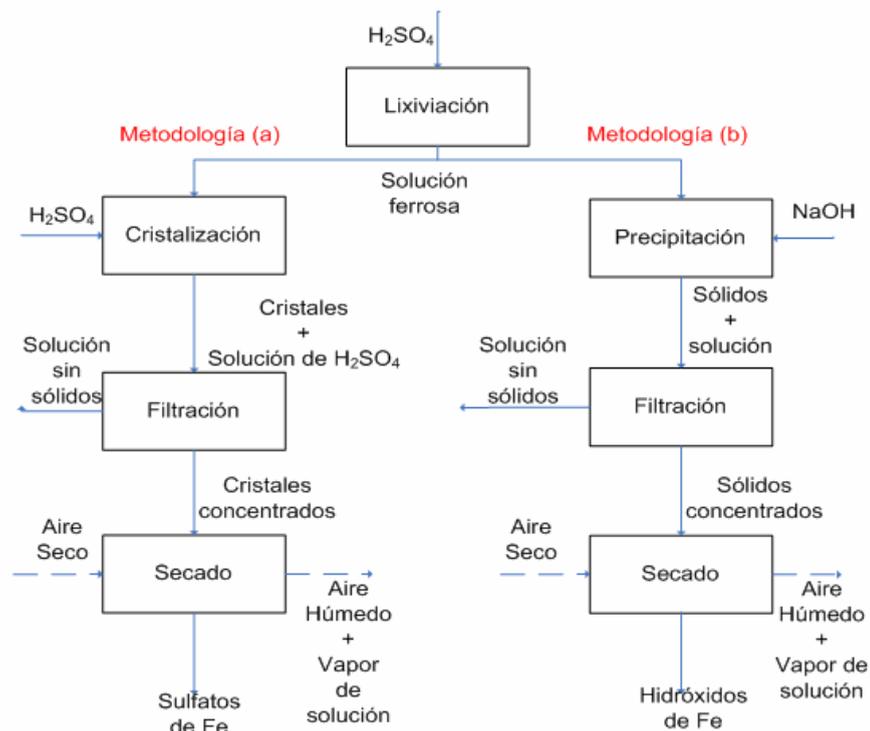


Figura 2. 1 Sistemas experimentales utilizados para la obtención de compuestos de hierro

Cada una de las etapas se realizó bajo distintas condiciones experimentales, las cuales se pasarán a describir a continuación.

2.1.1 Etapa de lixiviación de escoria

La etapa de lixiviación se realiza para ambas metodologías, etapa en que se extrae el hierro soluble en ácido sulfúrico de la escoria de cobre, formando una solución ferrosa o PLS. La lixiviación se llevó a cabo en una columna de vidrio a escala de laboratorio, trabajando con una muestra de escoria caracterizadas de aproximadamente 1 kg. Se realizó la lixiviación con una tasa de riego constante de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de 10 L/h/m^2 , durante un período en el cual se estimó que la recuperación de Fe desde la escoria sería alta y que se llegaría a un estado estacionario de recuperación de Fe, siendo éste de 9 días. En la Figura 2.2 se presenta el sistema experimental que se utilizó para la etapa de lixiviación, y en Anexos Figura 8.3.6 se pueden observar fotos del montaje experimental real en el laboratorio del sistema.

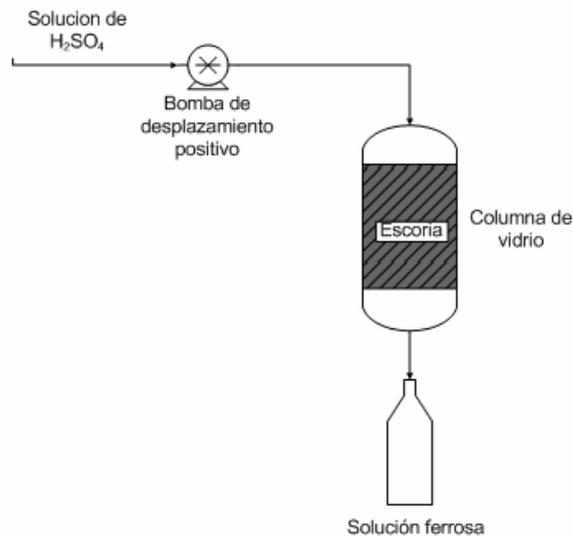


Figura 2. 2 Sistema de lixiviación

Durante varias semanas se intentó trabajar con lixiviación natural, es decir, que el pH de la solución de ácido sulfúrico de entrada se encontrara entre los 3 – 4, pero finalmente se pudo concluir que la extracción de hierro a partir de la escoria sería muy lenta en dicha condiciones. Es por eso que finalmente se trabajó con ácido sulfúrico de entrada 0,1M y 1M con pH de entrada de 0,9 y 0,26 respectivamente. Todos los resultados obtenidos en este diseño experimental se pueden observar en el Capítulo III de Resultados Experimentales. Esta etapa fue llevada a cabo a temperatura ambiente $20\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Equipos utilizados en etapa de lixiviación:

- Columna de Vidrio de diámetro 7,5 cm y altura de 49,5 cm
- Bomba peristáltica Cole Palmer Instrument 6-600 rpm, cabezal de 14''
- Recipientes de vidrio a la entrada de la columna para contener la solución de ácido sulfúrico y a la salida de la columna, para recibir la solución ferrosa.

Reactivos utilizados en etapa de lixiviación:

- Ácido sulfúrico diluido
 - 2M $\text{pH}_{\text{inicial}} 3,5$
 - 0,1M $\text{pH}_{\text{inicial}} 0,9$
 - 1M $\text{pH}_{\text{inicial}} 0,26$.

Basándose en la Figura 2.1, es posible observar las dos metodologías que se diseñaron para la obtención de compuestos de hierro, y, buscando un mayor detalle de éstas, se describirán a continuación.

2.1.2 Etapa de cristalización de compuestos de hierro

Se puede observar que esta etapa corresponde a la de la Figura 2.1 metodología (a).

Para poder cristalizar el hierro en solución, que se encuentra como hierro férrico y ferroso, se trabajó en un reactor agitado a $25\pm 1^\circ\text{C}$, debido a que las reacciones que ocurren dentro del reactor son altamente exotérmicas. El ácido sulfúrico se fue agregando a una velocidad constante de $0,25\text{ cm}^3/\text{s}$, para evitar fuertes aumentos de temperatura, hasta alcanzar una concentración en la solución de aproximadamente 50% p/p, y posteriormente se dejó un tiempo de residencia para que se formaran los cristales de 2 horas y media. Se utilizó la metodología de cristalización de saturación con ácido sulfúrico basándose en estudios anteriores relacionados con cristalización (Schmidt, 2005).

Después del tiempo de residencia establecido, los cristales fueron filtrados con filtros membrana de diámetro $0,22\text{ }\mu\text{m}$ y al vacío, y los cristales fueron posteriormente secados a $70\pm 1^\circ\text{C}$ durante un período de 48 hrs.

Todas las muestras, tanto sólidas como líquidas, fueron posteriormente analizadas químicamente (Fe, Si, S) para saber si se obtuvieron los compuestos de hierro deseados (sulfatos de hierro).

Un esquema general del diseño experimental de cristalización de compuestos de hierro se puede observar en la Figura 2.3.

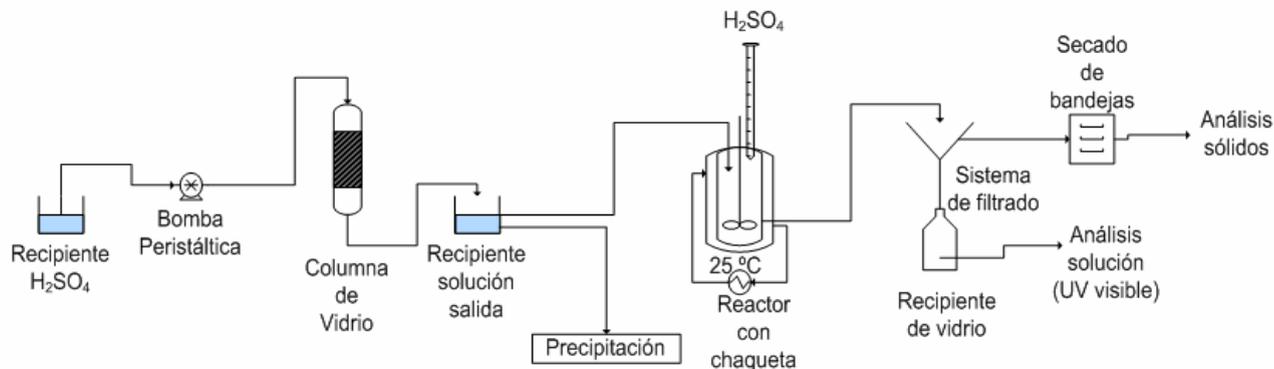


Figura 2.3 Metodología experimental para obtención de hierro cristalizado

Equipos utilizados en etapa de cristalización:

- Reactor agitado con chaqueta de capacidad máxima 300 cm^3
- Equipo para baño termostatzado PolyScience Modelo 9012.
- Bureta de capacidad 50 cm^3

Reactivos utilizados en etapa de cristalización:

- Ácido sulfúrico 96% p/p pureza

Equipos utilizados en etapa de filtrado:

- Filtro membrana de $0,22\text{ }\mu\text{m}$
- Bomba Vacío Cole-Palmer Modelo n° L-79200-05

Equipos utilizados en etapa de secado:

- Estufa Memmert (funcionamiento de 20 – 80 °C)

2.1.2 Etapa de precipitación de compuestos de hierro

La etapa de precipitación de compuestos de hierro corresponde a la Figura 2.1 metodología b).

En este caso se buscó obtener hidróxidos de hierro, por lo que la solución ferrosa proveniente de la etapa de lixiviación fue tratada con hidróxido de sodio (NaOH) en un reactor agitado a $25\pm 1^\circ\text{C}$, para mantener condiciones similares a la *metodología a*).

La cristalización a nivel de laboratorio ha sido ampliamente estudiada (Schmidt, 2005), mientras que la precipitación con NaOH no posee tantos estudios ni análisis a nivel laboratorio. Esto generó que fuera necesario realizar varias pruebas que permitieron entender la mejor forma de precipitar compuestos de hierro.

Primero se realizaron 4 pruebas distintas donde se agregó NaOH hasta llegar a distintos pH finales de la solución (5, 7, 9, 11) con un burbujeo constante de nitrógeno (N_2) para evitar la oxidación de la solución, considerando un tiempo de residencia de 2 horas para cada caso.

Segundo, se realizó una prueba adicional, bajo las mismas condiciones de operación que las anteriores de precipitación excepto que, en vez de utilizar un burbujeo de N_2 para evitar la oxidación la solución, se realizó un burbujeo constante de aire, para así lograr oxidar la solución y observar en cual de los dos casos se obtenía una mayor recuperación de compuesto de hierro. Se agregó NaOH hasta un pH final de 5.

Posteriormente los sólidos fueron filtrados y secados de forma similar al procedimiento seguido en la *metodología a*).

En la Figura 2.4 se puede observar con mayor detalle el diseño experimental utilizado para obtener compuestos de hierro a partir de precipitación con NaOH.

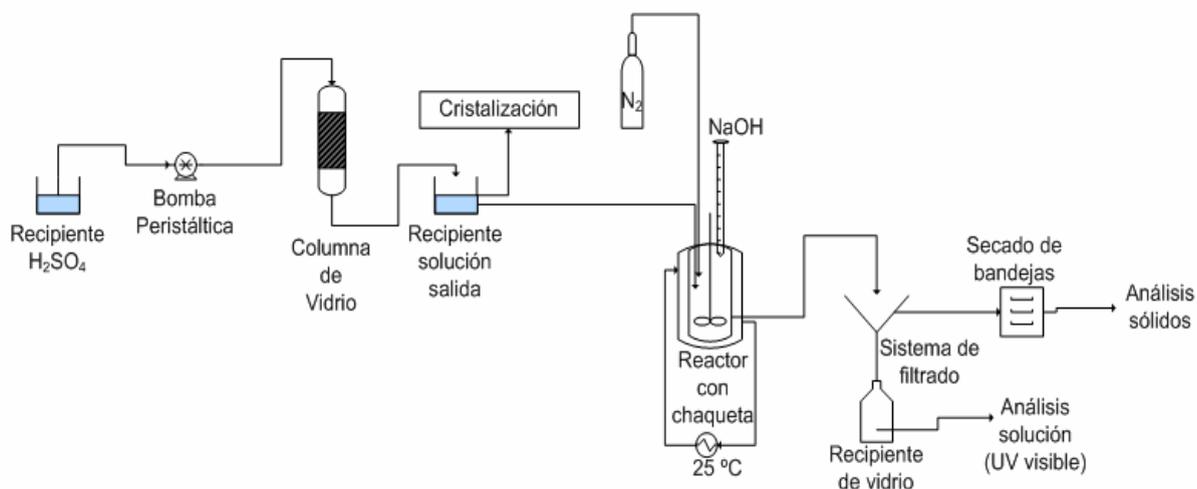


Figura 2.4 Metodología experimental para obtención de hierro precipitado

Equipos utilizados en etapa de precipitación:

- Reactor agitado con chaqueta de capacidad máxima 300 cm³
- Equipo para baño termostatzado PolyScience Modelo 9012.
- Bureta de capacidad 50 cm³
- Burbujeo constante de N₂
- pHmetro Schott, Modelo Titroline.
- Bomba de aire AA316(comunes de las peceras)

Reactivo utilizados en etapa de cristalización:

- solución de NaOH 1N, pH_{inicial} 13±0,1

2.2 Diseño conceptual

A partir de los datos de laboratorio obtenidos mediante el diseño experimental, se diseñó en forma conceptual el circuito que sería necesario para la producción de compuesto de hierro a nivel industrial. Para esto se realizaron las siguiente etapas:

- a. Diseño del diagrama de flujo del circuito estudiado.
- b. Resolución de balances de material a través de planillas en Excel.
- c. Dimensionamiento de equipos principales necesarios para escalar los datos experimentales obtenidos por este estudio a una escala industrial.
- d. Descripción y comparación entre alternativas de plantas obtenidas.

A partir de este diseño conceptual se podrán obtener los balances de masa y los diagramas de flujo que permitan escalar los resultados experimentales para una producción de sulfatos e hidróxidos de grado técnico^{VI} de hierro a nivel industrial, pues no serán completamente puros.

^{VI} Grado técnico: sustancia con pureza del proceso de síntesis, que se puede encontrar entre los 40% -90%, puede contener impurezas del proceso de síntesis.

Capítulo III

Resultados experimentales y análisis

Todos los resultados experimentales obtenidos para un posterior diseño del proceso de obtención de compuestos de hierro se describen a continuación.

3.1 Resultados de análisis de escoria

Como se mencionó anteriormente, para el desarrollo de este proyecto se trabajó con una muestra de escoria de fundición de cobre de El Teniente, obtenida después de la etapa de limpieza de escorias (HLE). En la Tabla 3.1 se presenta la caracterización físico-química de dicha muestra de escoria cabeza, donde se muestran los principales componentes de la escoria estudiada, observándose que existe una gran concentración de hierro, y una parte importante de este hierro es soluble en ácido sulfúrico. La escoria agotada después de la etapa de lixiviación 0,1M también fue caracterizada químicamente para posteriores balances de masa, resultados también mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Análisis químico de escoria^{VII}

Elemento	Fórmula	Escoria Cabeza	Escoria Lixiviada
		Concentración % en peso	% Concentración en peso
Azufre	S	0,46	0,58
Cobre	Cu	0,81	0,45
Hierro	Fe	46,14	46,31
Silicio	SiO ₂	27,30	28,83
Calcio	Ca	0,68	0,33
Otros	-	25,98	23,51

Del hierro total que se tiene en la escoria, una gran parte corresponde a hierro soluble en ácido sulfúrico, mientras que una parte muy pequeña corresponde a hierro soluble en agua, lo que lleva a pensar que el mejor agente lixivante sería el ácido sulfúrico. Este detalle del hierro soluble en agua y ácido sulfúrico, tanto para la escoria cabeza como la escoria agotada, se puede observar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Hierro soluble en Ácido sulfúrico

Elemento	Fórmula	Escoria Cabeza	Escoria Agotada
		Concentración % en peso	Concentración % en peso
Hierro Soluble en H ₂ SO ₄	Fe	20,35	25,14
Hierro Soluble en H ₂ O	Fe	0,03	0,04

Estudios de análisis microscópico mineralúrgico sobre las muestras de escoria de fundición han mostrado que el hierro se encuentra en distintas fases, tales como magnetita (Fe₃O₄), pirita (FeS₂) y arsenopirita, siendo la que está principalmente presente la magnetita, y corresponde a un

^{VII} El detalle del análisis químico de la Escoria esta descrito en la Figura 8.3.1 de Anexos

14,31% en peso. Estas distintas fases de hierro se encuentran en la escoria con distintos grados de liberación, asociación y oclusión, lo que podría influir en su posterior recuperación. En la muestra analizada se obtuvo que el grado de hierro liberado corresponde a un 3,07%, el hierro asociado a la ganga no metálica o masa vítrea corresponde a un 24,56%, mientras que el hierro ocluido a la masa vítrea corresponde a un 72,37%. Estas características de liberación, asociación y oclusión depende directamente de el tamaño de las partículas analizadas, detalle que se puede observar en la Figura 8.3.2 de Anexos, en la que se estudió el grado de liberación, asociación y oclusión dependiente del tamaño de las partículas, según las mallas Tyler.

Estos estudios también permitieron observar microscópicamente la presencia de las distintas fases de hierro dentro de la escoria, lo que se presenta en la Figura 3.1, en la cual se representa la magnetita asociada a la masa vítrea^{VIII}. Es importante mencionar que se pudo observar que los constituyentes de la mezcla no corresponden a especies mineralógicas naturales, sino a fases de soluciones sólidas entre sulfuros de cobre, fases de silicato (masa vítrea) y fases de hierro (magnetita, pirita y arsenopirita).

La masa vítrea corresponde a un 84,6% del total de la muestra analizada, mientras que las especies de hierro corresponden a un 14,3% del total.

En las Figuras 3.1 y 3.2 se pueden observar las especies presentes en la escoria, y principalmente la forma en que se encuentran asociadas dentro de la misma, lo que puede influir en los resultados finales de extracción de hierro de la escoria, pues las especies que se encuentra ocluidas dentro de la escoria pueden ser más difíciles de lixiviar.



Figura 3. 1 Magnetita (Mg) masiva asociada a la masa vítrea.

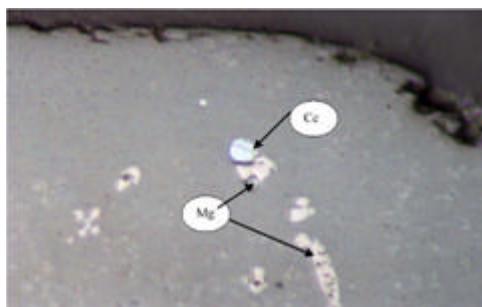


Figura 3. 2 Calcocina (Cc) asociada a magnetita (Mg), ambas ocluidas en masa vítrea

De un análisis granulométrico húmedo de la escoria cabeza se obtuvo que la distribución de tamaños de las partículas de la escoria se encontraban en su mayoría sobre los 212 μm , tal como

^{VIII} Masa vítrea: fase compleja entre variados compuestos de silicatos.

se puede observar en le Figura 3.3. Tanto el detalle de los datos de oclusión, liberación y asociación como los datos específicos del gráfico se puede observar en Anexos Figura 8.3.2.

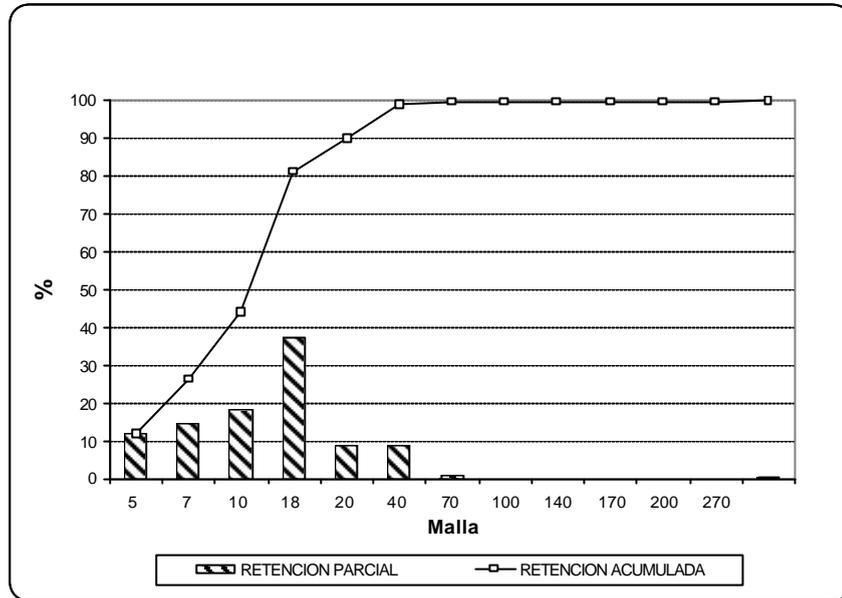


Figura 3.3 Distribución de tamaños de escoria cabeza

3.2 Resultados de lixiviación

Buscado encontrar las mejores condiciones de lixiviación con el menor consumo de ácido sulfúrico posible, es que se realizaron pruebas de lixiviación con distintos pH de entrada de la solución de ácido sulfúrico y diferentes concentraciones de H_2SO_4 . Estas pruebas se describirán a continuación.

3.2.1 Lixiviación natural

El primer experimento realizado fue un proceso de lixiviación natural de la columna de escoria, donde lixiviación natural se refiere a que el agente lixivante consistió en ácido sulfúrico 2M diluido con un $pH_{inicial}$ de 3,5. En este proceso, a pesar de mantenerlo funcionando durante varios días, se observó que la cantidad de Fe disuelto era muy baja y por lo tanto la lixiviación resultó ser lenta, tal como se observa en el Figura 3.4. Debido al tiempo en que era necesario desarrollar la totalidad de estos experimentos para el presente trabajo era limitado, fue necesario comenzar con experiencias de lixiviación forzada.

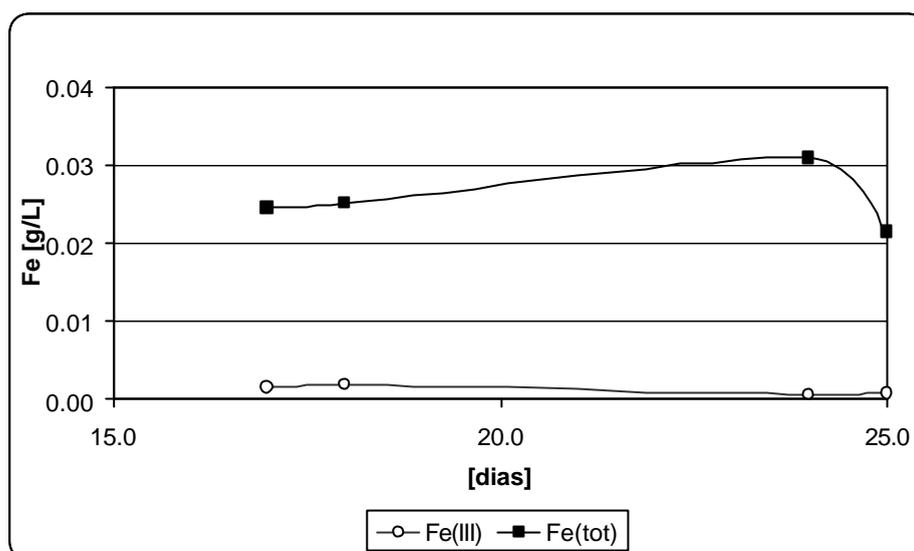


Figura 3.4 Extracción de hierro por lixiviación natural

3.2.2 Resultados de lixiviación forzada 0,1M

Lixiviación forzada se refiere a que el agente lixiviante posee una concentración de ácido sulfúrico más alta que en el caso de la lixiviación natural, generando un ambiente aún más reactivo para el hierro presente en la escoria, así extrayéndolo en un tiempo menor.

Utilizando el diseño experimental anteriormente descrito se trabajó con H_2SO_4 de concentración 0,1M y pH de entrada de 0,9.

La recuperación de hierro a partir de la escoria fue aumentando diariamente, como se puede observar en la Figura 3.5, donde se compara la recuperación real relacionada con el hierro que es soluble en ácido sulfúrico, por lo tanto es recuperable de la escoria, que corresponde a un 20,35% de la masa total, y la recuperación en relación al hierro total en la escoria, que corresponde a un 46,14% de la masa total. Así a través de una lixiviación de 9 días se logro recuperar un 17% del hierro total presente en la escoria, y un 8% del hierro soluble en ácido sulfúrico. A partir de estos datos se puede decir que es posible llevar a cabo una lixiviación por un tiempo más prolongado al utilizado en los experimentos realizados en este trabajo, pues se seguiría recuperando aún más hierro de la escoria. Esta afirmación se ve corroborada con la Figura 3.6, donde, a partir de la curva de la cinética de extracción del hierro, se puede observar que en el período estudiado de 9 días la extracción de hierro aún se mantenía constante, por lo que se podría seguir extrayendo de hierro a partir de la misma columna de escoria por un par de días más.

Por otro lado a partir de la Figura 3.7 se puede estudiar el detalle de la cinética del silicio, donde claramente se observa que a medida que pasan los días la extracción de silicio va disminuyendo, por lo que se espera que en un período de lixiviación superior a 9 días la concentración de silicio en la solución rica (PLS) habría disminuido bastante mientras que la concentración de hierro disuelto se mantendría, generando una solución ferrosa cuyas características servirían para las etapas posteriores de cristalización o precipitación, pues a mayor concentración en el PLS de compuesto deseado, en este caso hierro, puede haber mayor posibilidad de cristalizar o precipitar

este mineral, sin la presencia de otros elementos (Si, As, entre otros) que ya habrían sido lixiviados.

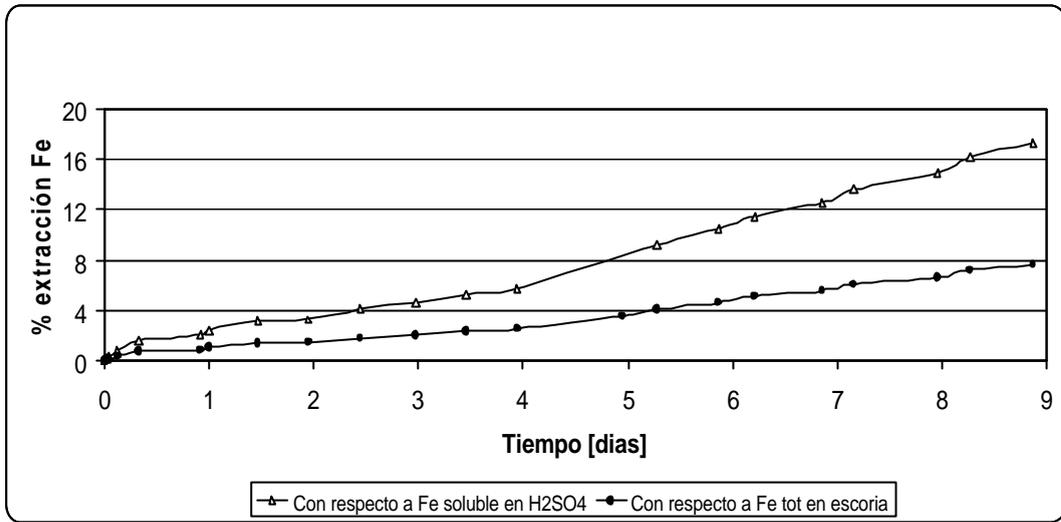


Figura 3. 5 Porcentaje extracción de hierro

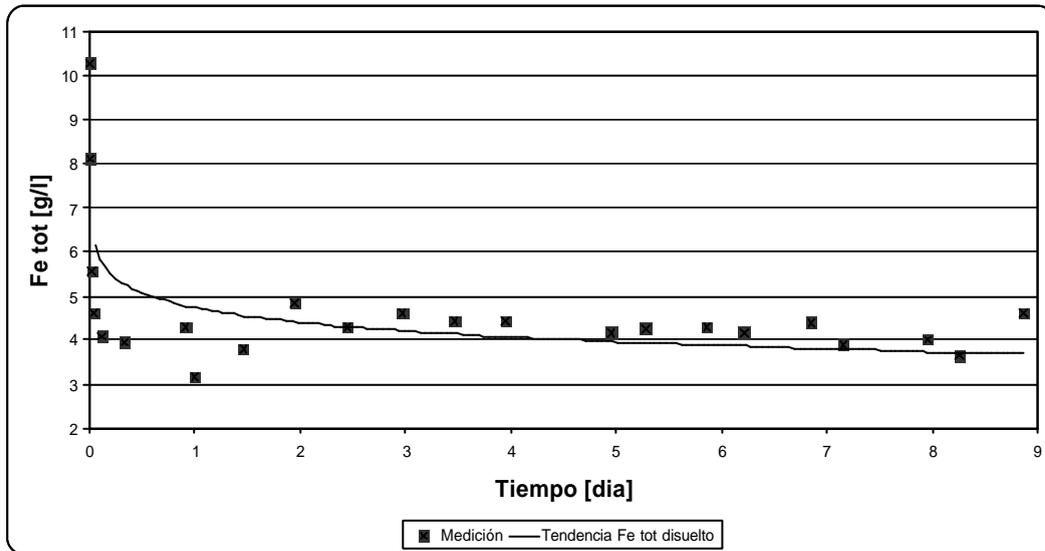


Figura 3. 6 Cinética lixiviación hierro total

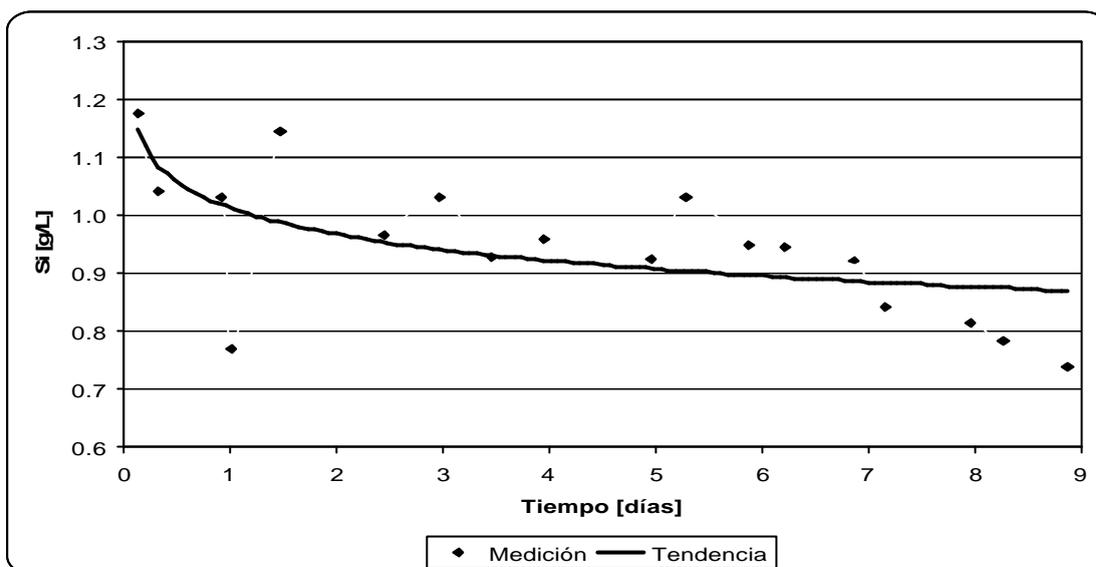


Figura 3. 7 Cinética de la lixiviación del silicio

Por otro lado en la Figura 3.8 se puede observar el consumo de ácido en el tiempo. En un inicio el consumo de ácido es bajo, debido a que en ese momento las partículas de la escoria inicialmente se ponen en contacto con el agente lixivante, pero posteriormente, cuando las reacciones que ocurren en la lixiviación comienzan, el consumo de ácido aumenta y se mantiene constante por el período total en que se realizó la lixiviación, por lo que se puede decir que en un período más largo de lixiviación, la tendencia de consumo de ácido seguiría constante.

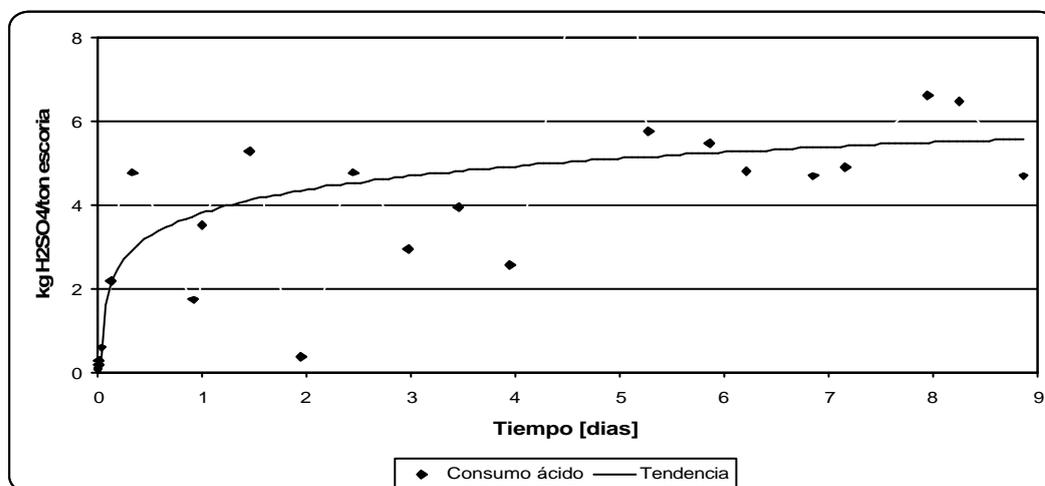


Figura 3. 8 Consumo de ácido sulfúrico

Por lo tanto de las Figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 se puede observar que el sistema de lixiviación llega a un estado estacionario de extracción de hierro de la escoria entre el día 3 y el 7, momento en que la extracción de los compuestos de interés y el consumo de ácido llegan a los siguientes valores:

Consumo de ácido:	5,4 kg H ₂ SO ₄ /ton escoria 2,3 kg H ₂ SO ₄ /kg Fe _{tot} disuelto lixiviado
Consumo de agua:	567 kg agua/ton escoria
Extracción hierro:	2,4 kg Fe disuelto/ton escoria
Extracción silicio:	0,5 kg Si disuelto/ton escoria

Estos valores posteriormente serán utilizados al momento de realizar los balances de masa para el diseño conceptual del proceso.

De los resultados obtenidos del análisis químico de la escoria cabeza y la escoria agotada en conjunto con el análisis de las soluciones obtenidas en la etapa de lixiviación es posible analizar la extracción de hierro y silicio a través de tres fórmulas distintas, por las soluciones obtenidas, por los sólidos finales que quedan y por la cabeza calculada. Las fórmulas utilizadas se encuentran en Anexos 8.5. El objetivo de poder comparar las distintas formas de extracción es para poder determinar si los análisis realizados a los sólidos o líquidos obtenidos fueron llevados a cabo de forma correcta o contaban con errores de medición. Como se observa en la Tabla 3.3, todas las extracciones de hierro y silicio calculadas fueron bastante similares, por lo que se puede concluir que los análisis realizados a la muestras no tuvieron errores relevantes de medición asociados. Así, se obtuvo una extracción de hierro del 7%, mientras que la extracción total del silicio fue en torno al 2%. Esto significa que el período de lixiviación experimental utilizado podría haber sido más largo, para así lograr una mayor extracción de hierro de la escoria, recuperado la mayor cantidad posible de una sola muestra de escoria.

Tabla 3. 3 Extracción de hierro y silicio en período de pruebas de lixiviación

		% Fe	%Si
Extracción Porcentual por	solución	7,68	2,84
	sólidos	7,16	2,34
	Cabeza Calculada	7,64	2,83

Todos los datos medidos y calculados para la cinética de lixiviación 0,1M se encuentran en Anexos Figura 8.3.9 y 8.3.10.

3.2.3 Resultados de lixiviación forzada 1M

Para poder observar las mejores condiciones de extracción de hierro de la escoria de fundición se llevó a cabo una segunda prueba de lixiviación con una concentración de ácido sulfúrico de 1M. Las otras condiciones experimentales se mantuvieron iguales (equipos, temperatura, toma de muestras), llegando a una mayor extracción de hierro, pues la concentración de hierro disuelto en la solución PLS es más alta que en el caso de que el agente lixivante tenía una concentración de 0,1M. Esta mayor extracción de hierro se puede observar en la Figura 3.9, donde claramente se observa que en todo momento la concentración de hierro en la solución PLS es superior a 10 g/L, incluso existe un momento en el cual la concentración de hierro bordea los 50 g/L, versus los 4 g/L que se tenían en el caso de la lixiviación con ácido sulfúrico 0,1M, comparación que se corrobora con la Figura 3.10. Este tipo de lixiviación presenta un mayor costo pues hay un mayor consumo de ácido, pero la extracción de hierro presente en la escoria es más rápida.

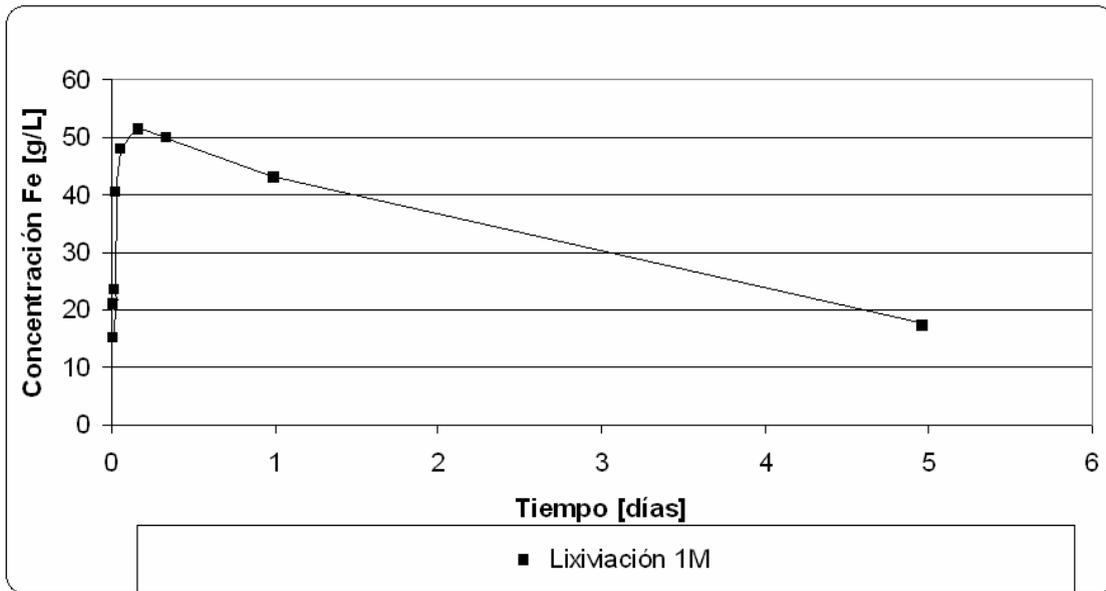


Figura 3.9 Hierro disuelto en lixiviación con ácido sulfúrico 1 M

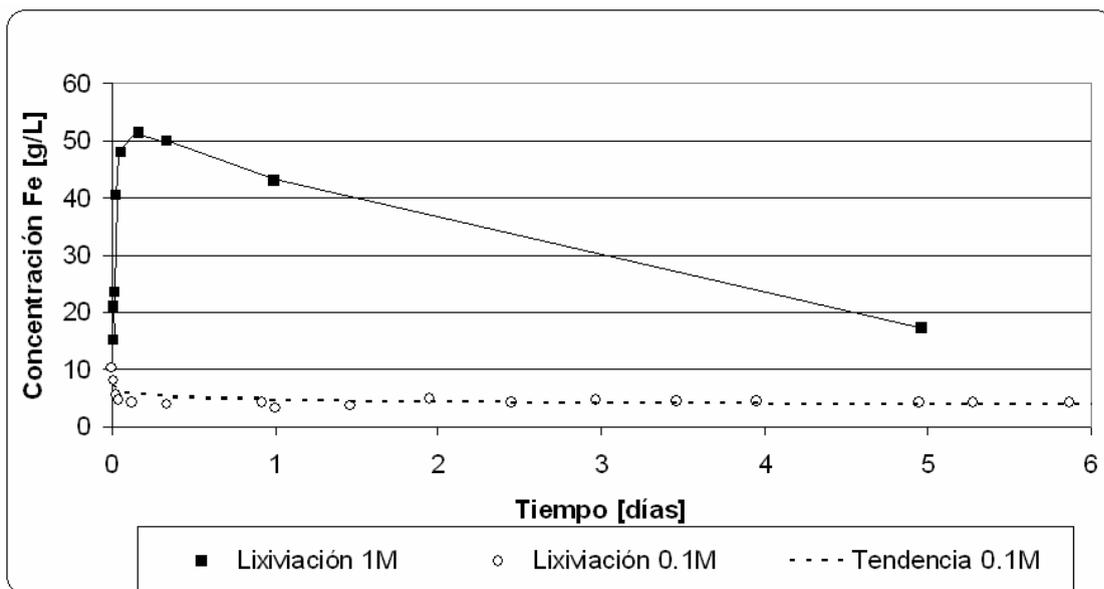


Figura 3.10 Comparación hierro disuelto según concentración de ácido sulfúrico

Por otro lado la cinética correspondiente al silicio se calculó de forma estimativa debido a que no se contó con los resultados de análisis de laboratorio, pero se realizó una estimación de esta cinética a partir de los datos experimentales de la lixiviación con ácido sulfúrico 0,1M. Se observó que la extracción de hierro para la lixiviación 1M correspondió a aproximadamente 10 veces más que la extracción en la lixiviación 0,1M, por lo que se asumió que en el caso de la cinética del silicio sucedería lo mismo. Eso sí, debido a que en la escoria existe una cantidad limitada de silicio, y que a medida que menos silicio quede en la escoria, más difícil será extraerlo, se asumió que la extracción de este elemento, el silicio, no se mantendría constante

durante todo el período de lixiviación, sino que disminuiría dependiendo del silicio restante en la escoria. La comparación de las dos cinéticas del silicio, experimental para lixiviación con solución 0,1M y teórica para lixiviación 1M, se observa en la Figura 3.11.

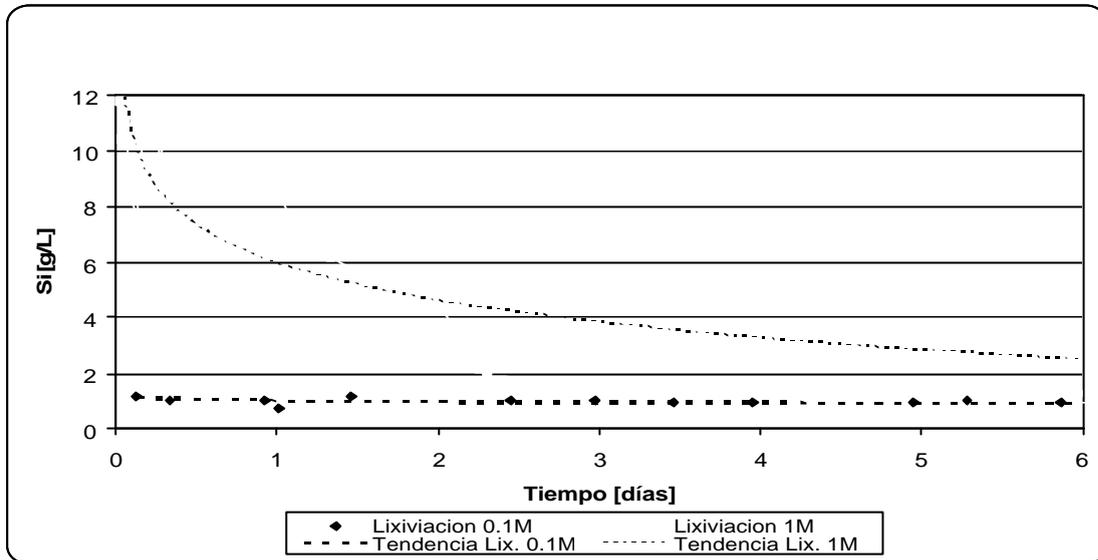


Figura 3. 11 Comparación cinética de lixiviación del silicio para ambos casos de concentración de agente lixiviante.

De la lixiviación 1M, se obtuvieron los siguientes datos a utilizar en los balances de masa posteriores:

Consumo de ácido:	11 kg H ₂ SO ₄ /ton escoria 4 kg H ₂ SO ₄ /kg Fe _{tot} disuelto lixiviado
Consumo de agua:	104 kg agua/ton escoria
Extracción hierro:	45 kg Fe disuelto/ton escoria
Extracción silicio:	2,2 kg Si disuelto/ton escoria

Por lo tanto la extracción de todos los elementos presentes en la escoria es mayor en esta lixiviación más ácida.

3.3 Resultados cristalización-filtración-secado

Para la cristalización de compuestos de hierro se utilizó la metodología de saturación con ácido sulfúrico la solución ferrosa obtenida de la etapa de lixiviación, hasta llegar a una concentración final de ácido de 50%p/p.

Primero se trabajó con la solución obtenida de la etapa de lixiviación con ácido sulfúrico 0,1M la cual poseía una concentración inicial de 4 g/L de hierro total disuelto. Los sólidos obtenidos de la cristalización, cuyo tiempo de residencia fue de 2 ½ horas y los cuales correspondían a un 26% de la masa total de solución cristalizada obtenida, fueron filtrados y posteriormente secados, donde aproximadamente un 84% de estos sólidos correspondía a humedad. De los resultados

experimentales se obtuvo que el ácido sulfúrico utilizado para la cristalización correspondió a 1043,5 kg H₂SO₄ agregado/m³ solución tratada, y que existía una gran parte de compuestos que no cristalizaron, por lo que fueron descartados en la solución residual. Los valores para los compuestos de descarte en la solución residual, que fueron utilizados para posteriores balances de masa, fueron:

Hierro no recuperado: 2,89 kg Fe disuelto/m³ solución tratada

Silicio no recuperado: 0,001 kg Si disuelto/m³ solución tratada

Sulfatos en solución residual: 839,45 kg SO₄ disuelto/m³ solución tratada

Por otro lado fue posible solidificar una cantidad considerable de hierro, silicio, azufre y sulfatos. Los sólidos obtenidos después de la etapa de cristalización eran transparentes y con características de gel, difíciles de filtrar y de secar. En la etapa de secado estos geles transparentes se fueron oscureciendo, tomando un color café, tal como se presenta en la Figura 3.12. Estas características de gel se le atribuye al silicio y los sulfatos que cristalizaron, cuyas reacciones deben haber sido más rápidas que la reacción entre el hierro y los sulfatos de la mezcla, por lo que se cristalizó más rápidamente el silicio que el hierro, y el hierro presente en los cristales quedó retenido entre los enlaces que se formaron entre el silicio y los sulfatos. Es importante recordar que la estructura molecular de los compuestos de silicio retiene bastantes moléculas de agua, razón por la cual el gel obtenido era difícil de secar, lo que se puede observar en la Figura 3.12, donde hay una gran cantidad de líquido que rodea al gel. La mayor cristalización de silicio y no de hierro se puede corroborar con los resultados experimentales obtenidos para posteriores balances de masa, donde el hierro cristalizado es bajo en comparación con el silicio y los sulfatos cristalizados.

Hierro cristalizado: 0,01 kg Fe cristalizado/m³ solución tratada

Silicio cristalizado: 0,06 kg Si cristalizado/m³ solución tratada

Sulfatos cristalizado: 4,21 kg SO₄ cristalizado/m³ solución tratada

Azufre cristalizado: 1,5 kg S cristalizado/m³ solución tratada



Figura 3. 12 Sólidos de la etapa de cristalización con solución inicial 0,1M de ácido sulfúrico

Todos los resultados experimentales obtenidos además de los datos calculados a partir de los experimentales se pueden observar en Anexos Figura 8.3.11.

Al analizar los resultados obtenidos de esta cristalización se observó que existe una relación importante entre la composición química de los sólidos que se cristalizaron y la razón que hay entre el silicio y el hierro disueltos en la solución PLS a cristalizar. Es por eso que también se realizó la cristalización de la solución obtenida de la lixiviación con ácido sulfúrico 1M, manteniendo todas las otras condiciones experimentales iguales (temperatura de cristalización, hasta un 50% p/p de H_2SO_4 final y velocidad de goteo de H_2SO_4). En este caso se observó, tal como se presenta en la Figura 3.13(a), que los sólidos obtenidos tenían un aspecto amarillo claro, menos gelatinoso que el caso anterior y aparecían después de 1 hora tiempo de residencia dentro del reactor versus las 2 ½ horas de la cristalización con solución lixiviada 0,1M. Estos sólidos, que poseían aproximadamente 10% de humedad, fueron posteriormente filtrados, secados y caracterizados, obteniéndose un sólido blanco y de granos finos. Después de diversos análisis fue posible determinar que existió una recuperación importante para cada uno de los elementos de interés, tal como se muestra en las siguientes cifras:

Hierro cristalizado:	1,68 kg Fe cristalizado/m ³ solución tratada
Silicio cristalizado:	0,09 kg Si cristalizado/m ³ solución tratada
Sulfatos cristalizado:	3,75 kg SO ₄ cristalizado/m ³ solución tratada
Azufre cristalizado:	1,38 kg S cristalizado/m ³ solución tratada

Por otro lado se observó que hubo cierta pérdida de hierro a través de la solución residual, al igual que silicio y sulfatos, como se presenta a continuación:

Hierro no recuperado:	2,4 kg Fe disuelto/m ³ solución tratada
Silicio no recuperado:	0,0004 kg Si disuelto/m ³ solución tratada
Sulfatos en solución residual:	314,32 kg SO ₄ disuelto/m ³ solución tratada

Los sólidos obtenidos de la segunda cristalización poseen una mayor cantidad de kg de hierro por m³ de solución tratada, lo que implica una mayor recuperación de este mineral y a la vez estos se acercan más a los sulfatos de hierro buscados. Esto también se corrobora en que el hierro no recuperado y descartado en la solución residual es menor en el caso de la cristalización con solución 1M que la cristalización con solución 0,1M.

De la Figura 3.13 se puede realizar un análisis cualitativo de los sólidos obtenidos al compararlos con los sulfatos de hierro que se comercializan actualmente en el mercado, tal como se observa en la parte (c) de dicha Figura. Los sólidos existentes en el mercado son blancos y bastante finos, y al compararlos con la figura (b) se observa una gran similitud en color y textura, por lo que se puede decir que los sólidos obtenidos a través del método experimental diseñado y con solución inicial de lixiviación 1M son sulfatos de hierro. La diferencia leve que tienen en color, blanco versus un color un poco amarillento, se debe a que los sólidos sintetizados a través del presente trabajo, Figura 3.13(b) se obtienen de escorias de fundición, por lo que se espera que tengan contaminantes en baja proporción, los que puedan influir en la calidad del sulfato final obtenido.

En la Figura 3.13(a) se puede observar la pulpa con sulfatos de hierro justo después de la etapa de cristalización pero previo a la etapa de filtrado, y claramente se puede observar que se generó un gran número de cristales.



Figura 3. 13 Sólidos de la etapa de cristalización con solución inicial 1M de ácido sulfúrico

Mediante un análisis de difracción por rayos X (DRX) se podrá determinar la pureza de los sólidos y su posterior aplicabilidad en el mercado. Este análisis DRX se mostrará más adelante en el trabajo. Los resultados experimentales obtenidos y aquellos que fueron posteriormente calculados se encuentran en Anexos Figura 8.3.12.

3.4 Resultados precipitación-filtración-secado

3.4.1 Resultados de variación de pH_{final}

Una forma alternativa de obtener compuestos de hierro a partir de la solución PLS es a través de precipitación con NaOH, como se describió en el capítulo II. Los principales resultados experimentales obtenidos de los diversos experimentos de precipitación se describirán a continuación.

Fue posible lograr precipitar gran parte de los elementos de interés que se presentaban disueltos en el PLS, pero esto dependía de cada pH_{final} alcanzado, lo que generó una PLS con mayor o menor precipitación de cada elemento (Fe, Si, S).

En la Tabla 3.4 se presentan los kg de elemento precipitado por m^3 de solución PLS tratada, lo que se ve reflejado más claramente en la Figura 3.14. Claramente se observa que a mayor pH_{final} de la solución precipitada, mayor recuperación de hierro, pero de la Figura 3.15 se puede observar que a mayor pH_{final} precipita una mayor cantidad de silicio, elemento que no se desea en el producto final pues altera la pureza de los hidróxidos de hierro deseados. Además, es importante considerar el consumo de NaOH en cada uno de los casos. Esto se puede observar en la Tabla 3.5, donde se describen los kg de NaOH consumidos por m^3 de solución tratada. Es por eso que al momento de considerar una metodología a utilizar, es necesario considerar estos tres factores de importancia: precipitación de los compuestos de importancia (Fe), precipitación de los compuestos no deseados (Si) y consumo de reactivo (NaOH).

Tabla 3. 4 Recuperación de elementos por precipitación a distintos pH

	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
kg Fe Precipitado/ m ³ solución tratada	0,59	1,13	0,92	1,40
kg Si Precipitado/ m ³ solución tratada	0,88	0,88	0,36	0,53
kg SO ₄ Precipitado/ m ³ solución tratada	0,61	1,15	0,83	0,99
kg S Precipitado/ m ³ solución tratada	0,23	0,37	0,27	0,33

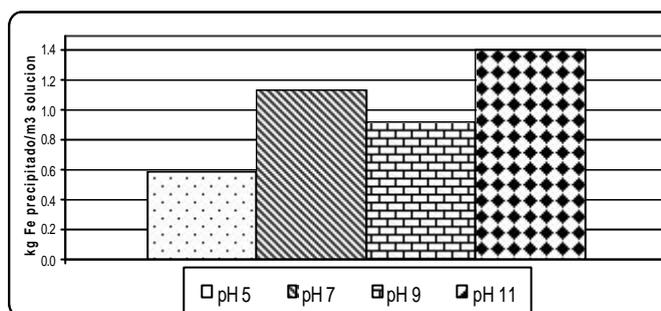


Figura 3. 14 Recuperación de hierro

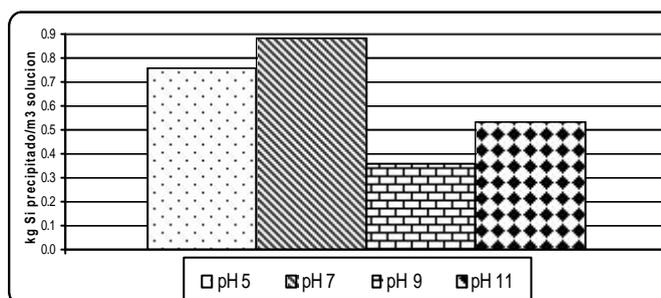


Figura 3. 15 Precipitación de silicio

Tabla 3. 5 Consumo de NaOH para cada caso de pH_{final}

	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
kg NaOH consumido/ m ³ solución tratada	94,6	186,6	363,0	397,0

Existe también una parte de los elementos del PLS que no precipitan, sino que se descartan en la solución residual. En la Tabla 3.6 se pueden observar los kg de elementos que no son recuperados por m³ de solución tratada, donde cabe notar que en el caso de pH_{final} 9 y 11 la cantidad de hierro en la solución residual es tan pequeña que se puede considerar como 0, por lo que se puede asumir que precipita todo el hierro que se encuentra en la solución inicial. Esta concentración de hierro en la solución residual también se puede ver reflejada en la Figura 3.16, donde se observa que a mayor pH_{final}, se recupera mayor cantidad de hierro del PLS. Teniendo este factor en cuenta, además del consumo de NaOH en cada uno de los experimentos, es posible poder determinar las condiciones óptimas de precipitación de hidróxidos de hierro.

Tabla 3. 6 Elementos en solución residual a distintos pH

	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
kg Fe disuelto/ m ³ solución tratada	3,72	2,10	0	0
kg Si disuelto / m ³ solución tratada	0,009	0,007	0,007	0,006
kg SO ₄ disuelto / m ³ solución tratada	7,76	7,80	6,50	6,05

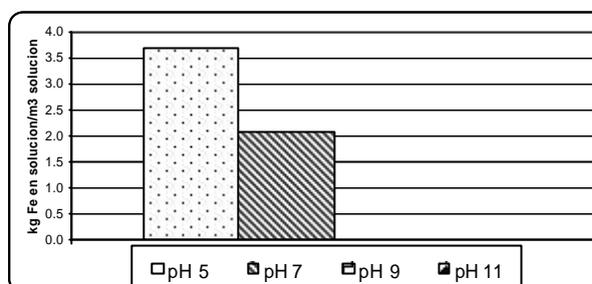


Figura 3. 16 Hierro en solución residual.

Los sólidos obtenidos en la pulpa para cada caso fueron posteriormente filtrados, así se calculó el porcentaje de sólidos en cada uno de los casos de pH_{final} estudiado, la cual se presenta en la Tabla 3.7. Estos sólidos filtrados tenían un aspecto de gel, cuyos colores variaban de café claro a café oscuro, dependiendo del pH_{final} de la pulpa.

Tabla 3. 7 Porcentaje sólidos en soluciones a la salida de la etapa de precipitación

	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
% sólidos	12,7	14,8	26,9	12,7

Los sólidos filtrados fueron posteriormente secados, y la humedad presente en cada uno de los geles secados se puede observar en la Tabla 3.8, donde las humedades de los sólidos previo a la etapa de secado son similares para todos los sólidos sintetizados y estudiados.

Tabla 3. 8 Humedad de sólidos al inicio de etapa de secado

	pH 5	pH 7	pH 9	pH 11
% Humedad	96,65	95,13	93,33	96,65

3.4.2 Resultados de oxidación/no oxidación de solución a precipitar

Al llevar a cabo experimentos con la oxidación de la solución a precipitar se obtuvo, tal como se presenta en la Tabla 3.9, que la precipitación de compuestos de hierro es más alta que al no oxidar la solución a precipitar. Por otro lado el consumo de NaOH es más de dos veces el consumo al no oxidar la solución, tal como se observa en la Tabla 3.10.

Tabla 3. 9 Recuperación de elementos con y sin oxidación de la solución

	pH 5 sin oxidación	pH 5 con oxidación
kg Fe Precipitado/ m ³ solución tratada	0,59	1,38
kg Si Precipitado/ m ³ solución tratada	0,88	0,57
kg SO ₄ Precipitado/ m ³ solución tratada	0,61	0,99
kg S Precipitado/ m ³ solución tratada	0,23	0,33

Tabla 3. 10 Consumo de NaOH con y sin oxidación de la solución

	pH 5 sin oxidación	pH 5 con oxidación
kg NaOH consumido/ m ³ solución tratada	94,6	274,3

De las Tablas 3.11, 3.12 y 3.13 se puede observar que la cantidad de sólidos de hierro generados oxidando la solución es mayor que al no oxidar la solución, que la humedad de los sólidos filtrados es prácticamente igual y que la solución residual al oxidar la solución posee menor cantidad de hierro disuelto que al no oxidar la solución a precipitar.

Tabla 3. 11 Elementos en solución residual con y sin oxidación de la solución

	pH 5 sin oxidación	pH 5 con oxidación
kg Fe disuelto/ m ³ solución tratada	3,72	0,87
kg Si disuelto / m ³ solución tratada	0,009	0,008
kg SO ₄ disuelto / m ³ solución tratada	7,76	6,30

Tabla 3. 12 Porcentaje de sólidos en las soluciones a la salida de la etapa de precipitación

	pH 5 sin oxidación	pH 5 con oxidación
% sólidos	12,7	22,0

Tabla 3. 13 Humedad de los sólidos al inicio de etapa de secado

	pH 5 sin oxidación	pH 5 con oxidación
% Humedad	96,65	95,96

Observado todos los datos presentados se puede concluir que oxidar la solución a precipitar no es una buena alternativa, por el alto consumo de NaOH.

Todos los datos experimentales medidos a través de las experiencias de precipitación y aquellos calculados a partir de los datos experimentales se podrán observar en Anexos, Figura 8.3.13.

Las soluciones o pulpas obtenidas del reactor de precipitación tienen diferentes colores dependiendo del pH_{final} al que se haya llegado. Los sólidos de estas pulpas sedimentaban rápidamente, por lo que se puede deducir que las partículas disueltas eran de un tamaño considerable. Para poder realizar un análisis visual de los sólidos obtenidos de la etapa de precipitación se tomaron fotos de los sólidos sedimentados tanto para las pulpas precipitadas con burbujeo de nitrógeno como la pulpa burbujeada con aire (oxidada), tal como se presenta en la Figura 3.17. Es posible observar que a mayor precipitación de compuestos de hierro, mas oscuros son los sólidos obtenidos, diferencia claramente observable entre el pH_{final} 5 y el pH_{final} 9. Por otro lado es interesante observar que en cada uno de los experimentos se observaron dos fases en los sólidos sedimentados, por lo que existen sólidos precipitados más pesados que otros dentro de la pulpa final, o que los sólidos sean inmiscibles entre sí. Finalmente se puede observar, también basándose en los resultados mostrados a lo largo del análisis de precipitación de compuestos de hierro, que a menor cantidad de base agregada, habrá una menor precipitación de compuestos de hierro, y gran parte del hierro disuelto se pierde por la solución residual. Esto se corrobora con las

fotos a continuación, pues a menor base agregada, la solución que se encuentra sobre los sólidos sedimentados es más opaca o “amarilla”, corroborando que hay hierro disuelto.

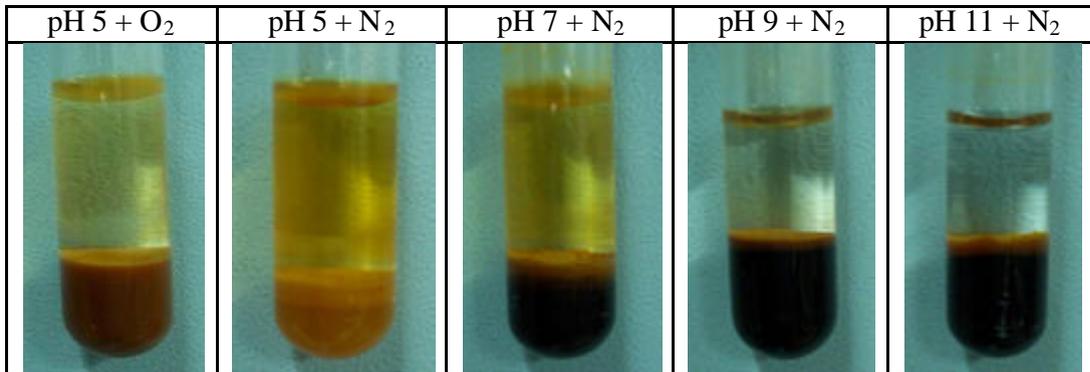


Figura 3. 17 Pulpas obtenidas después de la etapa de precipitación con burbujeo de nitrógeno

Después de la etapa de secado fue posible llegar a sólidos de color café rojizo y bastante duros, como se observa en la Figura 3.18(b). De la Figura 3.18(a) se puede observar los hidróxidos de hierro en su estado natural, por lo que se puede decir que los sólidos obtenidos a partir de los experimentos de precipitación tiene algunas características similares a las de los minerales de hierro, especialmente en la dureza y en los colores rojizos que poseen (características medidas sólo de forma cualitativa), pero que el sólidos obtenido experimentalmente posee un número de compuestos contaminantes, que permiten decir que este sólido no es apto para obtener hierro como metal puro, sino como compuestos que contienen hierro, tales como sulfuros o hidróxidos de hierro. Al comparar el sólido obtenidos a través de los experimentos cualitativamente con una roca de mineral de hidróxido de hierro, se puede observar claramente una mayor similitud, especialmente en los colores, lo que lleva a pensar que a través de los métodos experimentales planteados a lo largo del presente trabajo si se puede llegar a los hidróxidos de hierro buscados. Mediante un análisis DRX^{IX} se podrá determinar la pureza de los sólidos obtenidos.



Figura 3. 18 Sólidos obtenidos para distintos experimentos

^{IX} DRX: Difracción por rayos X

3.4.3 Análisis de difracción por rayos X de los sólidos cristalizados

Los sólidos obtenidos de la etapa de cristalización que posteriormente fueron filtrados y secados, se sometieron a análisis de DRX para poder determinar su composición, lo que entregará la verdadera pureza de dichos elementos.

De la Figura 3.19 entregada por el DRX se puede observar que, debido a que se presenta como una figura (curva) con *peaks*^X bien definidos, no existiendo zonas donde la figura tenga partes curvas, lo que significa que se está frente a un sólido cristalino.

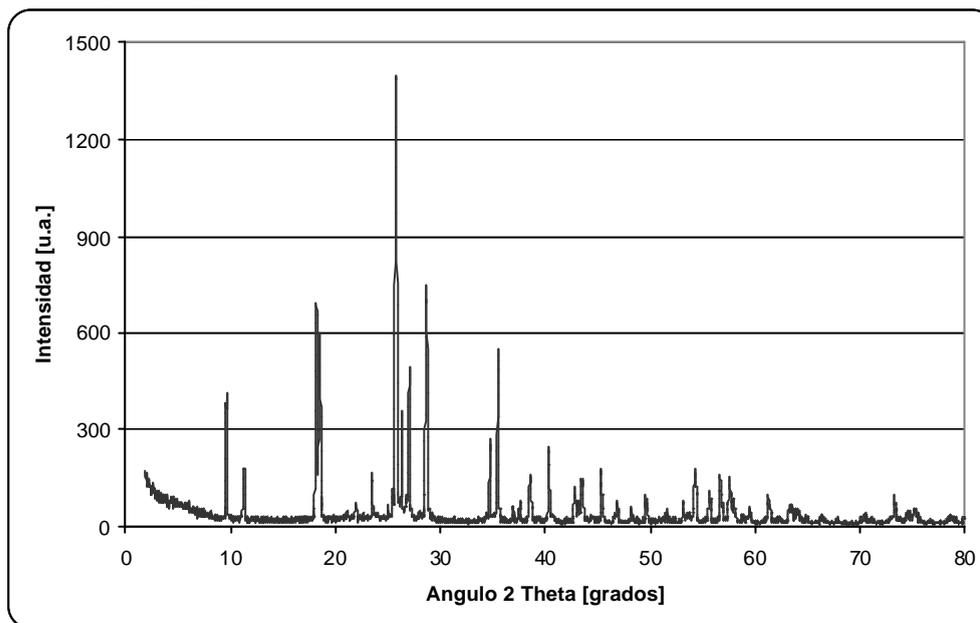


Figura 3. 19 DRX sólidos cristalizados

De la Figura 8.3.17 de Anexos, donde se compararon los *peaks* obtenidos en el DRX con bases de datos de cristalografía existentes, se obtuvo que el sólido estaba compuesto por distintos tipos de cristales de sulfatos y otros elementos, que hacen que el sólido final no sea tan puro como aquellos sintetizados en laboratorio de forma pura. Algunos de los compuestos presentes en el sólido sintetizado en el presente trabajo fueron:

- Melanterita [$\text{Fe(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$]
- Szomohokita [$\text{Fe(II)SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$]
- Sulfato de hierro hidratado [$\text{Fe(III)(SO}_4)(\text{H}_2\text{O})$]
- Rhomboclase [$\text{Fe(III)H(SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$]
- Copiapita [$\text{Fe(II)Fe}_4(\text{III})(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$]
- Cuarzo [SiO_2]
- Óxido de hierro [Fe_3O_4]
- Arsenato de cobre hidrogenado hidratado [$\text{CuAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$]

De estos compuestos se puede deducir que se obtuvieron sulfatos de hierro a partir de la cristalización, principalmente sulfatos ferrosos, y en general todos sulfatos hidratados. También el sólido contenía impurezas en la forma de silicio, arsénico y cobre, que fueron lixiviados a

^X Peak: áreas de la curva donde la intensidad es distinta a 0.

partir de la muestra de escoria y posteriormente cristalizados, pero se estima que en baja cantidad, por el porcentaje inicial pequeño que presentaba la escoria de otros compuestos,

De los análisis químicos de los sólidos cristalizados se obtuvo que estos contenían un 21,1% de hierro y un 17,37% de azufre. A partir de estos valores es posible estimar cual de los compuestos encontrados por el análisis DRX está presente en mayor cantidad en los sólidos finales y también determinar la pureza del mineral.

Se sabe que existe una directa relación entre la intensidad de los *peaks* que entrega el análisis DRX y la cantidad presente de cada compuesto identificado en el mineral. Del análisis DRX de la sólidos cristalizados (Figura 8.3.17 de Anexos) se puede observar que el *peak* que posee la mayor intensidad corresponde al cuarzo (SiO_2), al que le siguen en intensidad el rhomboclase, la melanterita y el resto de los compuestos. Por eso se puede decir que la presencia de otros compuestos que no son sulfatos de hierro son importantes dentro del sólido final. En la Tabla 3.14 se muestra una estimación de la presencia de cada uno de los compuestos más importantes identificados por el DRX, establecido de una relación existente con la intensidad, como se explicó anteriormente.

Tabla 3. 14 Análisis de presencia en sólido de cada uno de los compuestos

Fracción en sólido total		
0.3	Melanterita	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
0.2	Szomohokite	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
0.05	Sulfato de hierro hidratado	$\text{Fe}(\text{SO}_4)\text{H}_2\text{O}$
0.1	Rhomboclase	$\text{FeH}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
0.05	Copiapita	$\text{FeFe}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
0.3	Otros (SiO_2 , Fe_3O_4)	-
1	Total	

A partir de esta estimación se puede establecer la pureza del mineral, la cual se calcula con respecto al 21,1% de Fe total presente en el sólido. Si cada uno de los compuestos presentado en la tabla anterior se presenta en torno a la fracción establecida, la pureza del sólido estará en torno al 81%. Detalle de los valores usados para estos cálculos se encuentran en Anexos, Figura 8.4.7.

3.4.4 Análisis de difracción por rayos X de los sólidos precipitados

Los sólidos obtenidos por precipitación de la PLS con NaOH fueron sometidos a un análisis DRX, para así poder caracterizar las especies que los componen.

Se obtuvieron sólidos amorfos, debido a que las curvas de sus análisis DRX poseían *peaks* que no estaban bien definidos. Las especies presentes dependían estrictamente de las condiciones de formación, es decir, de las condiciones del experimento. Solo se analizaron vía DRX los sólidos donde se obtuvo una mayor precipitación de hierro, es decir, el caso de pH_{final} 9 y 11, y de pH_{final} 5 con oxidación de la solución.

Para un pH_{final} 9 se obtuvo que los sólidos estaban compuestos principalmente por:

- Nitrojarosita [$\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$]
- Óxidos de hierro no estequiométricos [$\text{Fe}_{21.3}\text{O}_{22}$]
- Cuarzo [SiO_2], óxido arsénico [As_4O_6]
- Óxido hidróxido de hierro [FeO OH]

- Goethita [FeO OH]
- Silicato hidrogenado [H₂Si₂O₅]

Entre otros, indicando que es un sólido que posee hidróxidos de hierro, pero a la vez posee una serie de impurezas también. El resultado del análisis DRX se puede observar en la Figura 8.3.14 de Anexos.

El caso de pH_{final} 11 los sólidos estaban compuestos principalmente por:

- Natrojarosita [NaFe₃(SO₄)₂(OH)₆]
- Diáspore [AlO OH]
- Óxidos de hierro no estequiométricos [Fe_{21.3}O₂₂]
- Cuarzo [SiO₂]
- Oxido arsénico [As₄O₆]
- Silicato de magnesio aluminio [MgAl₂Si₃O₁₀]
- Goethita [FeO OH], silicato hidrogenado [H₂Si₂O₅]

Entre otros, mostrando que el sólido obtenido es similar al obtenido a un pH_{final} 9. Este resultado del análisis se puede observar en la Figura 8.3.15 en Anexos.

Finalmente para el caso de pH_{final} 5 con oxidación de la solución a precipitar los sólidos estaban compuestos principalmente por:

- Goethita [FeO OH]
- Maghemita [Fe₂O₃]
- Oxido arsénico [As₄O₆]
- Silicato hidrogenado hidratado [H₄Si₈O₁₈·H₂O]
- Silicato hidrogenado [H₂Si₂O₅]

Entre otros, generando un sólido un poco diferente a los dos casos anteriores, pues precipitaron menos compuestos que en el caso de pH_{final} 9 y 11, generando así un sólido con menor cantidad de hidróxidos. Este resultado se puede observar en la Figura 8.3.16 de Anexos.

Una comparación entre las curvas obtenidas por DRX de los sólidos precipitados se encuentra en la Figura 3.19, donde la curva inferior corresponde a pH_{final} 9, la curva del medio al pH_{final} 11 y la curva superior al pH_{final} 5 con oxidación de la solución. De este gráfico se puede observar que los sólidos obtenidos son altamente amorfos, pues todas las curvas no poseen *peaks* bien definidos. La curva inferior y media corresponden a sólidos similares, pues los *peaks* que se producen son en general iguales, mientras que la curva superior es un sólido con compuestos un poco diferentes, debido a que posee distintos *peaks*.

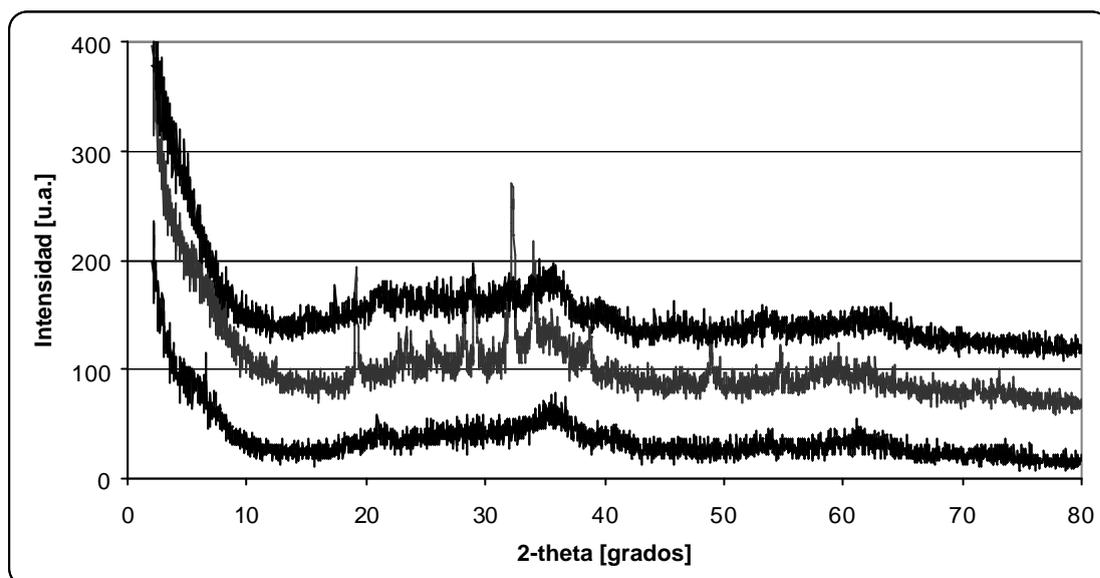


Figura 3. 20 Comparación entre especies presentes en sólidos de precipitación

A través del análisis DRX de los sólidos se observa que estos no son compuestos puros, sino que poseen contaminantes generados por la lixiviación de varios elementos presentes en la muestra de escoria inicial, lo que es esperable pues están generados a partir de escoria de fundición, la cual posee todos los elementos no deseados del proceso productivo del cobre.

Realizar el mismo análisis de porcentaje de presencia de cada compuesto encontrado por los análisis DRX en el sólido final involucra mayor dificultad, debido a que se precipitaron un mayor número de elementos, Na, As, entre otros, lo que dificulta poder estimar qué compuesto se encuentra en mayor proporción a los demás. Debido a que de todos los compuestos encontrados por el análisis DRX solamente 4 contenían hierro, y a su vez la mayoría poseía elementos que no están dentro de los hidróxidos de hierro (H, O, Fe), es que se estima que la pureza de estos sólidos estará bajo el 50%.

3.5 Discusiones y conclusiones parciales de los resultados experimentales

A partir de los resultados experimentales se puede decir que es posible generar compuestos de hierro a partir de los dos procesos planteados a través del trabajo, pero cada proceso se debe realizar bajo condiciones de operación distintas.

En el caso de la producción de sulfatos de hierro a través de cristalización, se pudo observar que al lixiviar la escoria con solución de ácido sulfúrico de concentración 0,1M y luego cristalizarla, no se obtuvieron sólidos con concentración de hierro altas, sino que principalmente se cristalizaron sulfatos y silicio en forma de geles, las cuales se encontraban bastante hidratadas. Al cristalizar solución proveniente de una lixiviación con ácido sulfúrico 1M se obtuvieron cristales con un mayor porcentaje de hierro, y con características físicas más parecidas a los sulfatos de hierro que ya existen en el mercado. Las condiciones de operación para la etapa de cristalización se mantuvieron constantes en el caso de la cristalización de solución proveniente de lixiviación 0,1M y aquella proveniente de una lixiviación 1M, por lo que la única diferencia entre ambos procesos sería la etapa de lixiviación, específicamente en el consumo de ácido sulfúrico. Es

necesario, al momento de evaluar económicamente este proyecto, poder identificar los beneficios que trae el poder producir sulfatos de hierro más puros versus el costo de el mayor consumo de ácido sulfúrico, dependiendo del precio de mercado del producto y el insumo al momento de llevar a cabo este proyecto.

Para la producción de hidróxidos de hierro a través de precipitación con NaOH, basta con una etapa de lixiviación con ácido sulfúrico 0,1M, pues a menor concentración de ácido, menores serán los costos de este insumo, y menores serán los costos del proceso en general. A través de precipitación con NaOH fue posible precipitar una gran parte del hierro disuelto, y, al comparar todos los resultados obtenidos de los diversos experimentos de precipitación realizados, es posible decir que las mejores condiciones se producen al precipitar hasta un pH_{final} de 9. Esto se debe a que, a pesar de que en un pH_{final} 11 precipita una mayor cantidad de hierro, también precipita una mayor cantidad de silicio, lo que altera la pureza del sólido final. También el consumo de NaOH a un pH_{final} 11 es mayor al consumo a un pH_{final} 9, factor importante a considerar al momento de evaluar un proyecto, pues afecta los costos de éste. A la vez se observó a través del análisis DRX que los sólidos obtenidos a través de ambos experimentos son similares, por lo que aquel que genere menores costos de operación será el óptimo para una escala industrial.

La opción de oxidar la solución a precipitar fue completamente descartada para llevarla a un proceso industrial, debido a que, a pesar de que la oxidación genera una mayor precipitación de compuestos de hierro, el consumo de NaOH es muy elevado, siendo dos veces más que en el caso de no considerar la oxidación de la solución, aumentando los costos finales del proceso. Las especies generadas, y analizadas a través de DRX, muestran que en su mayoría en el sólido hay distintos compuestos de silicio, por lo que este sólido posee mayor contaminantes que los sólidos generados bajo condiciones de no oxidación.

Capítulo IV

Diseño Conceptual

Para poder llevar este proceso a una escala industrial, es necesario definir los equipos que se utilizarán en el proceso. Es por eso que se buscó en el mercado aquellos equipos existentes que podrían servir para el proceso estudiado, considerando las características de los sólidos obtenidos en los experimentos. A partir de las conclusiones del capítulo anterior se puede decir que en el proceso de cristalización de sulfatos de hierro es necesario considerar condiciones de operación distintas a las que se utilizarán en la precipitación de hidróxidos de hierro, por lo que se diseñarán dos procesos distintos de producción de compuestos de hierro, un proceso para la producción de sulfatos de hierro y otro proceso para la producción de hidróxidos de hierro. Para ambos procesos se realizarán los balances de masa para producir 1 ton de compuesto de hierro al día, producción que se asimila a aquella de una planta pequeña.

4.1 Diagrama de procesos de diseño conceptual

Para poder diseñar con mayor detalle los procesos de obtención de compuestos de hierro estudiados a través del presente trabajo, es necesario comenzar planteando los diagramas de bloques de cada uno de los procesos de obtención de compuestos de sulfatos e hidróxidos, así identificando las principales corrientes involucradas y los consumos de cada insumo versus la cantidad de productos obtenidos.

Se estudiará cada proceso por separado, para así entender con mayor detalle cada uno, y posteriormente se presentará una comparación de ambos procesos para determinar, a grandes rasgos, las diferencias y similitudes entre ambos.

El diagrama de bloques para el proceso de producción de sulfatos de hierro se puede observar en la Figura 4.1 en conjunto con una tabla de entrada/salida de los principales insumos y productos del proceso.

Por otro lado en la Figura 4.2 se observa el diagrama de bloques del proceso productivo de hidróxidos de hierro, al cual también se le adjunta una tabla de entrada/salida de los principales insumos y productos del proceso analizado.

4.1.1 Proceso de cristalización de sulfatos de hierro

El diagrama de bloques del proceso se presenta en la Figura 4.1

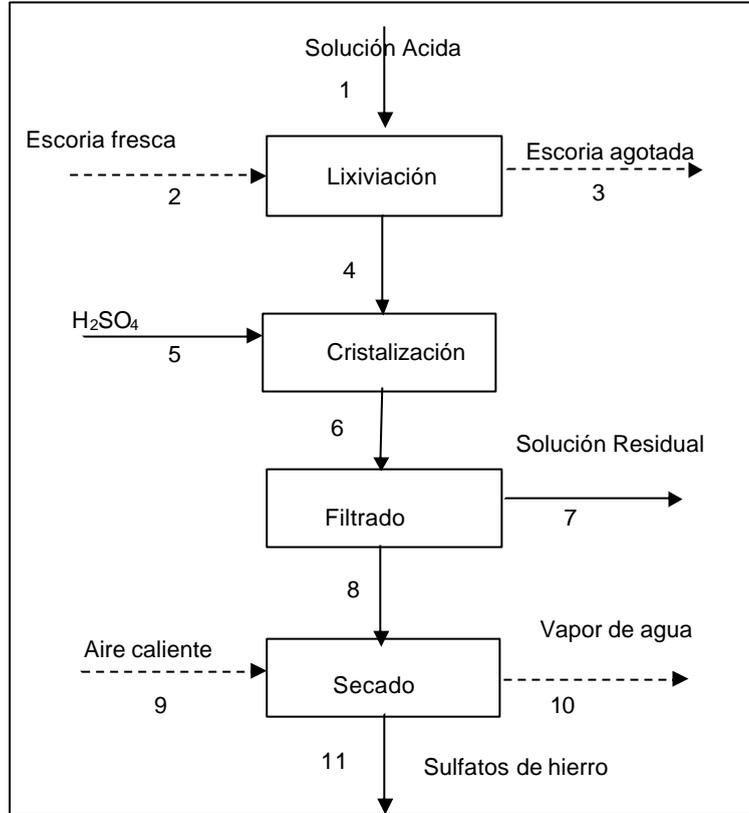


Figura 4. 1 Diagrama de bloques de producción de sulfatos de hierro

Tabla 4. 1 Balance entrada/salida proceso producción sulfatos de hierro

	Unidades	Entrada	Salida
Escoria	t/d	10,0	9,2
Ácido Lixiviación	t/d	0,11	0
H ₂ O	t/d	567	142
Ácido Cristalización	t/d	626	180,6
Cristales de Hierro	t/d	0	1,0
Solución Residual	t/d	0	341
Compuestos Sólidos Totales	t/d	0	4,8

La mejor condición para la obtención de sulfatos de hierro fue a través de la cristalización del PLS proveniente de la lixiviación con ácido sulfúrico 1M. Los sólidos obtenidos eran de un tamaño tal que permitían una operación de filtración o centrifugación, debido a que no eran sólidos de tamaño muy pequeño, por lo que no fue necesario diseñar otra etapa de separación, sólidos que fueron posteriormente secados. A partir del diagrama de bloques de la Figura 4.1 y la Tabla entrada/salida 4.1 se elaboró un diagrama de flujo tentativo para un proceso industrial que se utilizaría para la producción de sulfatos de hierro. Este diagrama de flujos de proceso industrial se observa en la Figura 8.4.1 de Anexos. A partir de este diagrama se realizaron los balances de masa de todo el proceso que se pueden observar en las Tablas 8.4.2 y 8.4.3 de Anexos, y el proceso productivo que se explica en el punto 4.2.

4.1.2 Proceso de precipitación de hidróxidos de hierro

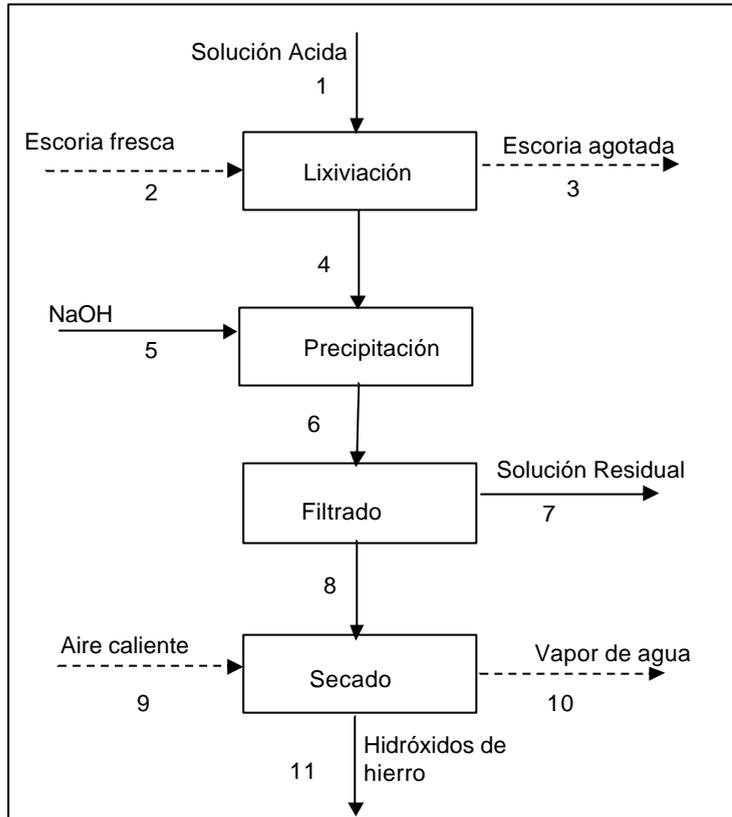


Figura 4. 2 Diagrama de bloques de producción de hidróxidos de hierro

Tabla 4. 2 Balance entrada/salida proceso producción hidróxidos de hierro

	Unidades	Entrada	Salida
Escoria	t/d	10,0	9,2
Ácido Lixiviación	t/d	0,05	0
H ₂ O	t/d	1193	872
Base para Precipitación	t/d	436	0
Precipitados de Hierro	t/d	0	1,1
Solución Residual	t/d	0	1021
Compuestos Sólidos Totales	t/d	0	7,2

En la Figura 4.2 se presenta el diagrama de bloques del proceso de producción de hidróxidos de hierro, y en la Tabla 4.2 se presenta un resumen de los balances de masa de la forma de balance entrada-salida, así es posible analizar a grandes rasgos los insumos necesarios para el proceso y los productos que se generarán. Es interesante notar que se generan 25 ton de sólidos diarios, donde sólo 1 ton corresponde a compuestos de hierro, siendo el resto otros sólidos, tales como Si, As, entre otros.

Se utilizó el mismo criterio que en el punto anterior para diseñar los diagramas de bloques y flujo para el proceso de obtención de hidróxidos de hierro mediante precipitación, utilizando las condiciones de mejor precipitación obtenidas a través del diseño experimental, donde la solución ferrosa proveniente de la etapa de lixiviación fue llevada a cabo con una concentración inicial de 0,1M de ácido sulfúrico, y la solución tratada por precipitación terminaría a un pH_{final} de 9. Esto se decidió en base a que esa condición considerada de pH_{final} resultó ser la óptima, debido a que en este caso existe una precipitación importante de hierro, casi completa, versus un consumo de hidróxido de sodio inferior al caso de pH_{final} de 11, que tenía una precipitación de hierro similar al caso de pH_{final} 9. Esta decisión es de importancia pues implica mayores costos para el proceso relacionado con el consumo de reactivos.

El diagrama de flujos del proceso de producción de hidróxidos de hierro se puede observar en la Figura 8.4.4 de Anexos. Para el diseño de esta etapa, y evitar la oxidación de la solución y a la vez reducir los costos de operación, se trabajara con un reactor cerrado, disminuyendo el contacto aire del medio con el PLS que esta reaccionando. Los balances de masa para este proceso se explicarán en el siguiente punto, pero el detalle se puede observar en las Tablas 8.4.5 y 8.4.6 de Anexos.

4.2 Balances de masa para diseño conceptual

Los balances de masa para los procesos estudiados fueron realizados considerando que la planta ya se encuentra en un estado estacionario de funcionamiento, lo que permite que la planta opere en forma continua. Es por eso que es necesario considerar inicialmente los tiempos de puesta en marcha de la planta, es decir, en la etapa de lixiviación hay que considerar el tiempo de carga de la pila, y posteriormente el tiempo que se demora el agente lixivante en pasar a través de la pila y salir por la parte inferior, es decir, un tiempo de mojado de la columna. Por otro lado las etapas de cristalización y precipitación, demoran tiempos específicos cada uno, de 1 y 2 horas respectivamente, el filtrado antes de llegar a un proceso continuo es de aproximadamente 6 horas para los sólidos cristalizados y 4 horas para los sólidos precipitados, y el secado es de aproximadamente 48 horas para todos los sólidos. Todos estos tiempos afectan en el tiempo de la puesta en marcha de la planta, es decir, el tiempo que demora la planta en llegar a un funcionamiento continuo. Por lo tanto hay que considerar un tiempo de puesta en marcha de la planta mayor a 24 horas.

Los detalles de los balances de masa para el proceso continuo se detallan en las Tablas 8.4.2 y 8.4.3 de Anexos para el proceso productivo de sulfatos de hierro, y en las Tablas 8.4.5 y 8.4.6 de Anexos para el proceso de hidróxidos de hierro. La base del cálculo es que cada planta debe producir un mínimo de 1 ton/día de compuestos de hierro, donde los compuestos de hierro se consideran como hierro puro, sin considerar las impurezas de silicio, azufre y sulfatos, entre otros, que generarán que la producción de la planta sea más grande a lo esperado al generar sólo compuestos puros de hierro. A continuación se describen los principales resultados y características de cada una de las etapas analizadas del proceso productivo.

4.2.1 Proceso de lixiviación de escoria

En la etapa de lixiviación de escoria de fundición se estima que cada pila de escoria de fundición debe ser de aproximadamente 100 ton, donde la carga y descarga de escoria es de 10 ton/día. Esto genera que sea necesario estar continuamente cargando y descargando las pilas, estando siempre una en funcionamiento, una en etapa de descarga, y una en etapa de carga. La tasa de riego de estas pilas se estima en 10 L/h/m^2 , y el tiempo de lixiviación de cada pila será de 11 días, permitiendo una holgura en los tiempos de carga y descarga de las otras pilas y a la vez intentando lixiviar la mayor cantidad de hierro soluble posible. El PLS generado será guardado en piscinas de almacenamiento, para así evitar problemas de abastecimiento a las siguientes etapas.

El PLS necesario para la etapa de precipitación de hidróxidos de hierro debe ser obtenido mediante la lixiviación de las pilas con solución de ácido sulfúrico 0,1M, mientras que el PLS que debe ser utilizado en la etapa de cristalización debe provenir de pilas de escoria lixiviada con solución de ácido sulfúrico 1M.

Diseño de planta para etapa de lixiviación 1M:

La cantidad de solución ferrosa necesaria para la etapa de cristalización cambiará con respecto a la solución ferrosa o PLS utilizado en la planta de precipitación, debido a que se obtuvo mayor cantidad de sólidos e la forma de sulfatos de hierro vía cristalización de la solución 1M.

Para mantener la producción de la planta de cristalización continua, es necesario generar $600 \text{ m}^3/\text{día}$ de PLS requeridos por la siguiente etapa de cristalización del proceso. Para esto se deberá trabajar con pilas que tengan un área total de riego de 110 m^2 , la que genera una producción de PLS de $621 \text{ m}^3/\text{día}$. Debido a que una pila que tenga dicha área de riego será difícil de armar por su gran tamaño, se utilizarán pilas de 100 toneladas cada una, con un altura de 2 m y de densidad $2,1 \text{ ton/m}^3$. Así será necesario trabajar con 4,6 o aproximadamente 5 pilas en paralelo de área de riego de $23,8 \text{ m}^2$ para producir la cantidad de solución ferrosa para la cristalización de 1 ton/día de compuestos de hierro.

El PLS generado por la lixiviación con ácido sulfúrico 1M deberá ser almacenado en piscinas. Sólo una piscina deberá tener un volumen de $4999,1 \text{ m}^3$ o aproximadamente 5000 m^3 (con un 15% de margen de seguridad), lo que es suficiente para almacenar la PLS que proviene de la etapa de lixiviación. Por lo tanto la piscina de almacenamiento tendrá un área superficial de 50 m x 25 m y una profundidad de 4 m.

Diseño de planta para etapa de lixiviación 0,1M:

Para la etapa de precipitación es necesario alimentar un flujo de PLS de $1.200 \text{ m}^3/\text{día}$, por lo que la etapa de lixiviación debe proveer dicha cantidad para mantener el proceso continuo.

El área de riego total de las pilas de escoria debe ser de 225 m^2 , pues ahí se generan $1.270 \text{ m}^3/\text{día}$ de PLS, satisfaciendo la demanda de la etapa posterior de precipitación. Por lo tanto, sabiendo que la densidad de la escoria es de aproximadamente $2,1 \text{ ton/m}^3$, y estimando que cada pila tendrá una altura de 2 m, será necesario estar lixiviando 9,5 o aproximadamente 10 pilas de 100

ton con un área de riego de 23,8 m² cada una, pues es difícil contar con una sola pila que cumpla con el área de riego requerida para producir suficiente PLS.

El PLS pasará a una piscina de almacenamiento, la cual tendrá una capacidad de almacenamiento de solución por una semana, en caso de existir problemas en la etapa de lixiviación, así manteniendo la producción de la planta continua. Considerando un 15% de margen de seguridad para evitar problemas de rebases de solución, la piscina debe tener un volumen de 10.225 m³. Debido al gran volumen que es necesario almacenar, será mejor almacenar el PLS en dos piscinas, cada una con un margen de 15% de seguridad, por lo que el volumen de cada piscina sería 5.112 m³, con un área de 50mx25m y profundidad de 4,1m. Por lo tanto el flujo que sale de la etapa de lixiviación deberá ser dividido en dos para ser almacenado en las piscinas.

4.2.2 Proceso de cristalización, filtración y secado de sulfatos de hierro

La solución almacenada en la piscina pasará a una siguiente etapa de cristalización en reactores capaces de mantener la temperatura constante (con chaqueta, por ejemplo).

Para producir 1 ton/día de compuestos de hierro, es necesario estar tratando la PLS de 25 m³ de PLS/hora, o más bien 600 m³ de PLS/día. A esta solución tratada se le añadirán 340,3 m³ de ácido sulfúrico/día o más bien 14,2 m³ de ácido sulfúrico/hora.

Como el tiempo de residencia de la cristalización es de 1 hora, será necesario trabajar con un reactor de capacidad mínima 39,2 m³ y al considerar un margen de seguridad de un 15% para evitar problemas de rebases u otros, este reactor debe tener finalmente una capacidad aproximada de 45 m³. De esta forma se producirán 1,008 ton/día de compuestos puros de hierro, dentro de 4,8 ton/día de sólidos totales que produce la planta, correspondiendo el resto a impurezas de silicio, sulfatos, azufres, y otros. Es mejor trabajar en una planta que tenga dos reactores, así teniendo un equipo auxiliar en caso de fallas del reactor principal.

Después de la etapa de cristalización un flujo constante de pulpa (sólidos y líquido) de 940,3 m³/día pasará a filtros de disco que operan de forma continua. En el mercado existen filtros disco cuya apertura de malla varía entre los 10 µm – 100 µm y que son capaces de filtrar hasta 1 m³/s por filtro (Biolight, 2006). Recordando que es necesario filtrar 940,3 m³/día de pulpa, se estará trabajando con un solo filtro que opere a un 1,25% de su capacidad total, considerando un 15% de margen de seguridad en caso de emergencias en la planta. Será mejor contar con dos filtros en total en la planta, para así poder realizar mantenimientos periódicos que eviten problemas futuros con los filtros. En la Figura 4.3 se observa la estructura general de un filtro disco.



Figura 4. 3 Filtros discos disponibles en el mercado.

Posteriormente un flujo de 5,3 ton/día de sólido, que posee aproximadamente un 10% de humedad, pasará a un secador. Estos pueden operar de forma continua (bajando la velocidad de

paso de los sólidos a través de este equipo en una huincha transportadora) o trabajar por lotes (batch), dependiendo del proceso productivo seleccionado para la planta. El mercado de los secadores industriales es amplio, existiendo una extensa gama de alternativas para dicho proceso, por lo que será necesario evaluar esta operación dependiendo de las características del terreno donde se trabajará y el personal con que se contará.

4.2.3 Proceso de precipitación, filtrado y secado de hidróxidos de hierro

El caso de precipitación de compuestos de hierro es distinto al caso de cristalización de compuestos de hierro, pues es necesario estar tratando 100 m³ de PLS continuamente en la planta cada 2 horas, pues éste tiempo es el de residencia de la etapa de precipitación. Por lo tanto se procesarán 1200 m³/día.

A esta PLS tratada se le agregarán 205 m³/día de reactivo, más específicamente, NaOH. A partir de estos valores es posible decir que el reactor tiene que tener una capacidad mínima de 59 m³/hora, es decir, el reactor tiene que tener un tamaño mínimo de 59 m³. Considerando un margen de seguridad de 15%, la capacidad total del reactor debe ser de 68 m³. Trabajando a esa capacidad se producirá 1,1 ton/día de compuestos de hierro puros, dentro de 7,2 toneladas de sólidos totales (considerando las impurezas) que produce la planta diariamente. Se recomienda que la planta cuente con dos reactores de dicha capacidad, para mantener la producción de la planta continua en momentos de mantención o falla de los equipos.

Después de la etapa de precipitación es necesario pasar a una etapa de filtración de los sólidos. La etapa de filtración deberá tratar 1405 m³/día de pulpa en filtros discos tal como los que se mencionaron anteriormente en la cristalización. Si se trabaja un filtro disco de las mismas características (apertura de malla y capacidad máxima de filtro), y teniendo un margen de seguridad de 15% para evitar saturar el filtro, éste funcionará a un 1,9% de su capacidad total. De todas formas se recomienda contar con un filtro auxiliar, en caso de fallas del filtro principal.

Finalmente los sólidos secados pasarán a una etapa de secado, donde los secadores deberán procesar 102,9 ton/día de sólidos, los cuales poseen aproximadamente un 93% de humedad. Basándose en las mismas recomendaciones mencionadas en el secado de los cristales se tendrá la producción de sólidos deseada.

4.2.4 Comparación entre procesos planteados

Hasta el momento pareciera que ambos procesos productivos son similares y factibles, por lo que a continuación se entregará una tabla resumen de las características para la producción de sulfatos de hierro como hidróxidos de hierro. Todos los valores que se analizan en la tabla son aquellos que varían entre los dos procesos, aquellos que se mantuvieron constantes no serán mencionados.

Tabla 4. 3 Resumen de diseño de planta

Característica		Proceso productivo de sulfatos de hierro	Proceso productivo de hidróxidos de hierro
Lixiviación	Consumo Ácido [t/d]	1	0,1
	Volumen de PLS a producir [m ³ /d]	621	1270
	Área de riego	110	225
	Cantidad total de pilas de área constante	5	10
	Cantidad piscinas almacenamiento PLS	1	2
Reactor (cristalización, precipitación)	Tamaño [m ³]	45	68
Filtración	Cantidad filtros	1	1
	Capacidad máxima utilizada	1,25%	1,9%
	Volumen a filtrar [m ³ /d]	940,3	1405
Secado	Masa a secar [t/d]	5,3	102,9
Producto final	Hierro [t/d]	1,0	1,1
	Sólidos totales (con impurezas [t/d]	4,7	7,2

A partir de la Tabla 4.3 es posible realizar un análisis de las ventajas y desventajas de realizar cada uno de los procesos, cada uno para la producción de 1 t/d de compuestos de hierro, el cual será analizado en discusiones parciales.

4.4 Discusiones parciales del diseño conceptual

Como se observó en la introducción del presente trabajo, los usos de los sulfatos de hierro con diversos, principalmente como coagulante en el tratamiento de agua, pero estos compuestos de hierro pueden ser substituidos fácilmente por compuestos de aluminio. Esto genera que si un compuesto de sulfato de hierro es vendido a precios muy elevados en el mercado debido a sus altos costos de producción, no será aceptado por los clientes, por la existencia de alternativas más económicas en el mercado. Es por eso que es importante evaluar en detalle los costos económicos de la planta de sulfatos de hierro, pues a pesar de ser de un tamaño inferior que una planta de hidróxidos de hierro, hay un mayor consumo de ácido sulfúrico en la etapa de lixiviación, lo que puede generar un mayor costo en insumos, y finalmente subiendo el precio de venta en el mercado de los sulfatos.

Por otro lado los hidróxidos de hierro poseen menos aplicaciones que los sulfatos de hierro, pero su producción a través de los procesos estudiados podría ser más rentable a nivel industrial, debido a los aspectos relacionados con los insumos, pues existe una menor concentración de ácido sulfúrico requerida por la solución inicial lixivante, como en el tamaño y cantidad de los equipos necesarios para obtener finalmente una producción de 1 ton/día de compuestos puros de hierro.

Es necesario, a futuro, averiguar si estos productos obtenidos con impurezas, es decir de grado técnico, son aplicables en algún proceso productivo existente, es decir, si las impurezas que contiene el sólido final obtenido influye o no en los procesos en los cuales los sulfatos o hidróxidos son utilizados (ya sea como coagulantes, floculantes, entre otros), y así poder determinar su aplicabilidad real en el mercado.

Capítulo V

Discusiones Generales

A partir del estudio experimental y diseño conceptual realizados se pudo observar que es posible la extracción de compuestos de hierro desde la escoria de fundición. Sin embargo, se requieren estudios adicionales a mayor escala antes de poder aplicar estos resultados de laboratorio a una escala industrial.

Los resultados experimentales y la información de diseño conceptual presentados en este estudio están basados en una muestra de escoria de fundición proveniente de la Fundición de cobre Caletones de Codelco-Chile, División El Teniente. Es importante destacar que cada Fundición tiene procesos productivos distintos, por lo que la composición de sus escorias de fundición puede variar considerablemente. Incluso el mineral extraído de la mina, de donde se obtuvo la escoria después del proceso piro-metalúrgico, puede influir en la calidad final de los compuestos de hierro. Por ello, es importante poder analizar independientemente las escorias provenientes de distintas plantas de fundición de cobre, observar en cuál de ellas se cuenta con un mayor contenido de hierro, soluble de hierro en ácido sulfúrico, para poder aplicar el proceso planteado a través del presente trabajo.

Los compuestos de hierro obtenidos a través del proceso estudiado presentaron bajo contenido de impurezas, siendo la principal el silicio, lo que puede influir en los usos finales de los compuestos de hierro a producir. Esto se debe a que la escoria inicial lixiviada es un desecho de otro proceso productivo, por lo que posee varios elementos no deseados. Al lixiviar la escoria con ácido sulfúrico no sólo se extrae el hierro, sino que también se arrastran otros elementos de silicio, calcio, magnesio, e incluso arsénico, entre otros, que a pesar que se encuentran en muy bajo porcentaje en la escoria inicial, de todas formas influyen en el sólido final obtenido. Sería interesante poder estudiar, a futuro, formas de separación de las impurezas contenidas en los compuestos de hierro producido, de modo de generar aplicaciones y compuestos con mayor valor agregado.

La influencia del silicio sobre la cristalización de compuestos de hierro también es un punto de interesante análisis. Los sulfatos obtenidos a través del presente trabajo al cristalizar las soluciones ricas generadas con ácido 0,1M poseen una serie de inconvenientes relacionados con el alto contenido relativo de silicio, lo cual dificulta el rendimiento del proceso, la calidad del producto y la separación sólido-líquido. Los resultados experimentales en este punto indicaron que la concentración de silicio en la solución inicial a cristalizar tiene una fuerte influencia en los cristales finales que se obtienen, pues este reacciona con los sulfatos presentes en la solución y forma geles que atrapan algunos átomos de hierro entre sus enlaces, y se dificulta mucho el lograr la cristalización del hierro. Es por eso que en las soluciones a cristalizar es necesario contar con una concentración baja de silicio versus una alta concentración de hierro disuelto, para obtener una buena cristalización y rendimiento del proceso. Se deja planteado que a futuro se estudien dichos efectos del silicio, y también los otros elementos lixiviados que se consideren como impurezas, dentro de la cristalización de compuestos de hierro, pues el mundo de los geles y el silicio es un área de investigación que actualmente cuenta con un serie de estudios para intentar entender las causas de su formación y los efectos que pueda tener en el compuesto final. Por eso en este estudio se decidió trabajar con soluciones ricas provenientes de la lixiviación de escoria

con soluciones ácidas 1M, pues ésta poseía una menor concentración de silicio relativa al hierro disuelto.

La precipitación de compuestos de hierro resultó ser un método factible para el mercado actual, y a la vez fue posible estudiarlo en más detalle a través del presente trabajo debido a que las reacciones producidas y los sólidos generados estuvieron dentro de los compuestos de hierro buscados. De las pruebas realizadas fue posible observar que es necesario llegar a un pH superior a 9 para poder precipitar casi completamente el hierro que se encontraba en la solución inicial a precipitar, por lo que el consumo de NaOH es considerable, y será necesario poder comparar, al momento de la instalación de la planta de producción de compuestos de hierro, los costos de un proceso que utilice una mayor cantidad de NaOH versus la pureza de los compuestos finales obtenidos y su precio de venta en el mercado. A través de este trabajo se deja planteado que es posible precipitar compuestos de hierro con NaOH y que su precipitación aumenta en la medida que aumenta la cantidad de este reactivo en la solución.

Con respecto al diseño de la planta de producción de compuestos de hierro a nivel industrial, se obtuvieron resultados favorables, pues es factible la instalación de dicha planta, pero este análisis se realizó a grandes rasgos. Aún es necesario realizar pruebas piloto en terreno, para así determinar si las condiciones que se aplicaron en el laboratorio se pueden mantener en terreno, utilizando los valores experimentales obtenidos mediante este trabajo como referencia. También falta una evaluación económica de cada planta, lo que permitirá determinar los beneficios involucrados. Ambos estudios se dejan planteados para ser realizados, así completando la información disponible sobre la instalación real de estas plantas.

Debido a que el presente estudio se debió llevar a cabo en un período de tiempo limitado, y considerando que no se partió de resultados experimentales previamente conocidos, sino que se generaron datos experimentales completamente nuevos, es que se dejan bastantes puntos planteados para estudios futuros en el área, pues la necesidad de valorar la escoria presente en las plantas piro-metalúrgicas deberá ir creciendo año a año, y será necesario aplicar un proceso conocido para reutilizar dichas escorias. Países como Corea y Japón ya están utilizando la escoria de diversos procesos mineros para la extracción de elementos valiosos, y estudios de la Universidad de Concepción¹¹ también se han enfocado a lo mismo, por lo que el presente trabajo es una alternativa de uso para un problema creciente actual de Chile.

¹¹ Proyecto Fondef se puede encontrar en <http://www.fondef.cl/bases/fondef/PROYECTO/02/I/D02I1159.HTML>, <http://www2.udec.cl/panorama/imasd/n07/p08.htm>

Capítulo VI

Conclusiones

A través del presente trabajo se puede concluir que es posible obtener compuestos de hierro a partir de escorias de fundición. Para la obtención de dichos compuestos de hierro se plantearon dos metodologías, las cuales permiten obtener distintos productos de hierro que pueden ser utilizados en el mercado.

La primera metodología para la obtención de compuestos de hierro es a través de la cristalización, vía saturación con ácido sulfúrico de la solución rica (PLS) obtenida de una etapa previa de lixiviación de la escoria con ácido sulfúrico. Es importante recordar que en la cristalización de sulfatos de hierro la proporción entre hierro disuelto en el PLS versus el silicio disuelto juega un rol importante, pues si existe una concentración de silicio importante en relación a la concentración de hierro, el primer elemento cristalizará más rápidamente que el segundo. Es por ello, que es necesario lixiviar con soluciones de ácido sulfúrico concentradas, en torno a 1M, para así lixiviar inicialmente la mayor cantidad de silicio posible y después tener PLS con concentraciones de hierro altas con respecto a la concentración de silicio. A través de esta metodología se pudieron obtener sulfatos de hierro, los cuales pueden ser utilizados principalmente como coagulantes o floculantes en tratamiento de aguas. El consumo de ácido para la etapa de lixiviación de esta metodología estuvo en torno a los 11 kg H_2SO_4 por tonelada de escoria, mientras que el consumo de agua fue de aproximadamente 104 kg por tonelada de escoria. A través de la cristalización de sulfatos de hierro se produjeron 1,68 kg de compuestos de hierro por m^3 de solución tratada, los cuales poseían una humedad en torno al 10%. Los compuestos principales que se pudieron obtener de este proceso fueron sulfatos de hierro hidratados, en la forma de melanterita y szomohokita, con una pureza estimada en torno al 81%, por lo que constituye un producto en grado técnico. El silicio es la impureza principal.

La segunda metodología propuesta corresponde a la precipitación de compuestos de hierro con hidróxido de sodio a partir de una solución rica en hierro proveniente de una etapa de lixiviación de escoria de fundición, la cual fue lixiviada con soluciones de ácido sulfúrico menos concentrado que en la etapa de cristalización, 0,1M, debido que, bajo las condiciones de trabajo, fue posible precipitar casi todo el hierro presente en el PLS, y no afectó el silicio presente en la solución. Esto genera menores costos en los reactivos utilizados en el proceso y una alta recuperación del elemento valioso buscado, el hierro. El consumo de ácido sulfúrico para la lixiviación 0,1M fue de 5,4 kg por tonelada de escoria, y el consumo de agua en esta misma etapa fue de 567 kg por tonelada de escoria. A través de esta metodología se obtuvieron hidróxidos de hierro, los cuales pueden ser utilizados para la depuración de aguas y eliminación de gases sulfhídricos en los efluentes industriales. De la etapa de precipitación fue posible obtener que se generaron aproximadamente 0.9 kg de compuestos de hierro por m^3 de PLS tratado. Finalmente, se puede decir que el sólido obtenido presentó impurezas de silicio y azufre estimadas en torno al 50% que afectan las propiedades y los usos del compuesto final. Estas impurezas se presentaron a un porcentaje más alto que en el caso de los sulfatos de hierro cristalizados.

El diseño conceptual realizado para una planta de producción de compuestos de hierro para cada uno de las metodologías propuestas permitió determinar que para producir 1 t/d de sulfato de hierro se requiere de una planta de tamaño inferior que para producir la misma cantidad de

hidróxidos de hierro. La etapa de lixiviación para la planta de hidróxidos de hierro debe ser 2 veces más grande que en la etapa de precipitación de compuestos de hierro, pues la planta de sulfatos de hierro debe trabajar simultáneamente con 5 pilas de escoria de 100 toneladas, mientras que la planta de hidróxidos de hierro debe trabajar con 10 pilas de lixiviación que estén trabajando en paralelo. A la vez una planta de sulfato de hierro debe procesar 600 m³ de PLS por día, mientras que una planta de hidróxidos debe procesar 1200 m³ de PLS por día, por lo que la etapa de reacción el proceso de hidróxidos también deberá ser 2 veces el del proceso de sulfatos. El proceso de obtención de sulfato de hierro consume aproximadamente 445,5 t/d de ácido sulfúrico para la lixiviación y como reactivo de cristalización, mientras que el proceso de hidróxidos consume aproximadamente 0,05 ton/día de ácido sulfúrico para la lixiviación y 436 t/d de NaOH como reactivo de precipitación.

Del presente trabajo fue posible obtener una forma alternativa de uso de escorias de fundición de cobre. El poder llevar este proceso productivo a escala industrial implicaría un gran aporte al medio ambiente, pues se reducirían en un porcentaje la contaminación producida por la escoria de fundición, que actualmente crece día a día, y también significaría un aporte a las fundiciones que actualmente generan escoria y la acumulan, pues generarían un subproducto con valor económico que mejoraría los ingresos de la empresa.

Capítulo VII

Bibliografía

Axelsson, Goran. Scandinavian Mineral Gallery. Enero 2004.

<<http://www.geology.neab.net/pictures/indx0010.htm>> [consulta: 20 Julio 2006]

Biolight Sistemas de Purificación. Microfiltración de grandes cantidades de agua. Filtros disco.

2006. <http://www.biolight.cl/productos/index.php?opcion_actual=productos&cid=1&id=2>

[consulta: 17 Agosto 2006]

Biswas, A.K, y Davenport, W.G. 1993. El cobre, Metalurgia Extractiva. Primera Edición. Editorial Limusa. México. 470p.

CNPMLTA. Centro Nacional de Producción más limpia y Tecnologías Ambientales de Colombia. Comisión Nacional de Producción más limpia. Tratamiento de Residuos Hospitalarios. Capítulo 2: Tratamiento.

<<http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID53.pdf>>

[consulta: 20 Junio 2006].

Cochilco. Comisión Chilena del Cobre. Desarrollo sustentable, Ámbito Nacional, Normativa Ambiental del Sector Minero. 2004.

<http://www.cochilco.cl/desarrollo/nacional/normativa_residuos.asp>

[consulta: 15 Junio 2006].

Cochilco^[a]. Comisión Chilena del Cobre. Informe Trimestral del Mercado del Cobre. Julio 2006:

<http://www.cochilco.cl/anm/articlefiles/164-Trimestral_26JULIO2006_FINAL.pdf> [consulta:

30 Junio 2006].

Cochilco^[b]. Comisión Chilena del Cobre. Evolución de la Industria Mundial de Fundiciones y sus Perspectivas en Chile en el Período 2004 – 2012. 2006.

<<http://www.cochilco.cl/anm/articlefiles/164-205-265-fundiciones.pdf>>

Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. CONICYT. 19 Abril 2005. Ojo también Valen.

<http://www.conicyt.cl/comunicados/conicyt_prensa/2005/abril/19abril/Ojo_Tambien_Valen.html>

[consulta: 20 Octubre 2005].

EPER – España. Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Ministerio del Medio Ambiente.

<<http://www.eper-es.com/pdfs/gt25cu-3.pdf>>

[consulta: 19 Septiembre 2005].

Espinoza, Rodrigo. 1999. Estudio de Factibilidad Técnica de la utilización de escoria de cobre en la producción de materiales en base a Cemento Pórtland. Tesis Universidad de Chile, Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas.

Guarachi Ingenieros Ltda. Análisis Microscópico Mineralúrgico Sobre Muestra Escoria. Santiago. Septiembre 2005.

Guerrero, José. Biotecnología en la disolución y recuperación de metales. Presentado en el Primer Congreso Peruano de Biotecnología y Bioingeniería. Trujillo. Perú. Noviembre 1998.

Kemiron Companies Inc. Empresa productora de coagulantes para tratamiento de aguas. <<http://www.kemiron.com>> [consulta: 3 Julio 2006].

Kiuru, Heikki. 2003. Dissolved Air Flotation. En: RALSTON, J. Y MILLER, J. y RUBIO, J. Flotation and Flocculation from Fundamentals to applications. Snap Printing. pp. 187-194.

Ministerio de Minería. Análisis de la Industria de fundición y refinerías de cobre en Chile. 2001. <<http://www.minmineria.cl>> [consulta: 1 Junio 2006].

Ministerio de Minería. Informe Trimestral del Mercado del Cobre. I Trimestre 2006. <<http://www.minmineria.cl>> [consulta: 1 Junio 2006].

Morillo, Carlos. 2003. Desarrollo de modelos fenomenológicos de Precipitación de Hierro desde soluciones hidro-metalúrgicas. Tesis Universidad de Chile, Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas.

Orellana, Claudia. 1995. Estudio de pre-factibilidad flotación de escoria de reverbero división El Teniente de Codelco, Chile. Tesis Universidad de Chile, Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas.

Opta Minerals Inc. Ebonygrit from Copper Slag. Visitada en Abril 2006. <http://www.optaminerals.com/ebonygrit_copper_slag.html > [consulta: 20 Junio 2006].

Perata, Juan; Schmalko, Miguel. Modelado de la Transferencia de Calor y Materia en el Zapecador. Facultad de Ciencias Exactas, químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones. Misiones. Argentina. <http://www.alimentosargentinos.gov.ar/0-3/infusion/Trab_Interes/Modelado_Zapecador.pdf> [consulta: 20 Octubre 2005].

Química Universal. El Portal de la Química en lengua española. El sulfato de hierro beneficia la Producción Agrícola. Marzo-Abril 2004. Visitada en Junio 2006. <<http://www.quimicauniversal.com/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=7786>> [consulta: 20 Noviembre 2005].

Riveros, Gabriel. 2004. Apuntes de Clases: Piro-metalurgia MI51A. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Schmidt, Marcela. 2005. “Diseño conceptual de proceso para el tratamiento de soluciones metalúrgicas de descarte mediante saturación con ácido sulfúrico concentrado”. Tesis Universidad de Chile, Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas.

Silva, Mariano. 1999. “Aplicación de un modelo cinético para la lixiviación de minerales de cobre oxidados”. Tesis Universidad de Chile, Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas.

Universidad de Concepción. Panorama en Internet. 21 Agosto 2003. Una propuesta para dar valor a residuos de la industria minera .

<<http://www2.udec.cl/panorama/p491/p10.htm>>

[consulta: 9 Noviembre 2005].

Universidad de Valladolid. Departamento de Física de la Materia Condensada. Cristalografía y Mineralogía. España. 2006. Características de los Minerales. Óxidos e Hidróxidos. Aplicaciones de óxidos e hidróxidos.

<http://greco.fmc.cie.uva.es/mineralogia/contenido/clases_miner3_3.html>

[consulta: 9 Junio 2006].

Universidad Politécnica de Madrid. España. Escuela técnica Superior de Ingenieros de Montes. 2006.

<<http://www.montes.upm.es/Dptos/DptoSilvopascicultura/Edafologia/guia/Manual/Oxidos.html>>

[consulta: 15 Julio 2006]

Wang, George; Emery, John. Technology of Slag utilization in highway technology. John Emery Geotechnical Engineering Limited. Toronto. Canada. 2004. <<http://www.tac-atc.ca/english/pdf/conf2004/emery.pdf>>

[consulta: 15 Noviembre 2005]

Water Specialists Technologies LLC. About Chemical Precipitation. <http://www.waterspecialists.biz/html/about_chemical_precipitation.html>

[consulta: 20 Junio 2006].

Wikipedia, la enciclopedia libre. Definición de Hierro. 2006.

<<http://es.wikipedia.org/wiki/Hierro>>

[consulta: 2 Junio 2006].

Capítulo VIII

Anexos y Apéndices

8.1 Glosario

8.1.1 Abreviaturas usadas

CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente

CONICYT: Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica

Cu: Cobre

Fe: Hierro

M: Molar

Mo: Molibdeno

Ni: Níquel

PLS: Pregnant Leach Solution o solución rica en el mineral que se quiere lixiviar, en el caso del presente trabajo: hierro.

RISes: Residuos Industriales sólidos

Unidades:

t/d: toneladas por día

t: toneladas

µm: micrómetros

8.2 Anexos Introducción

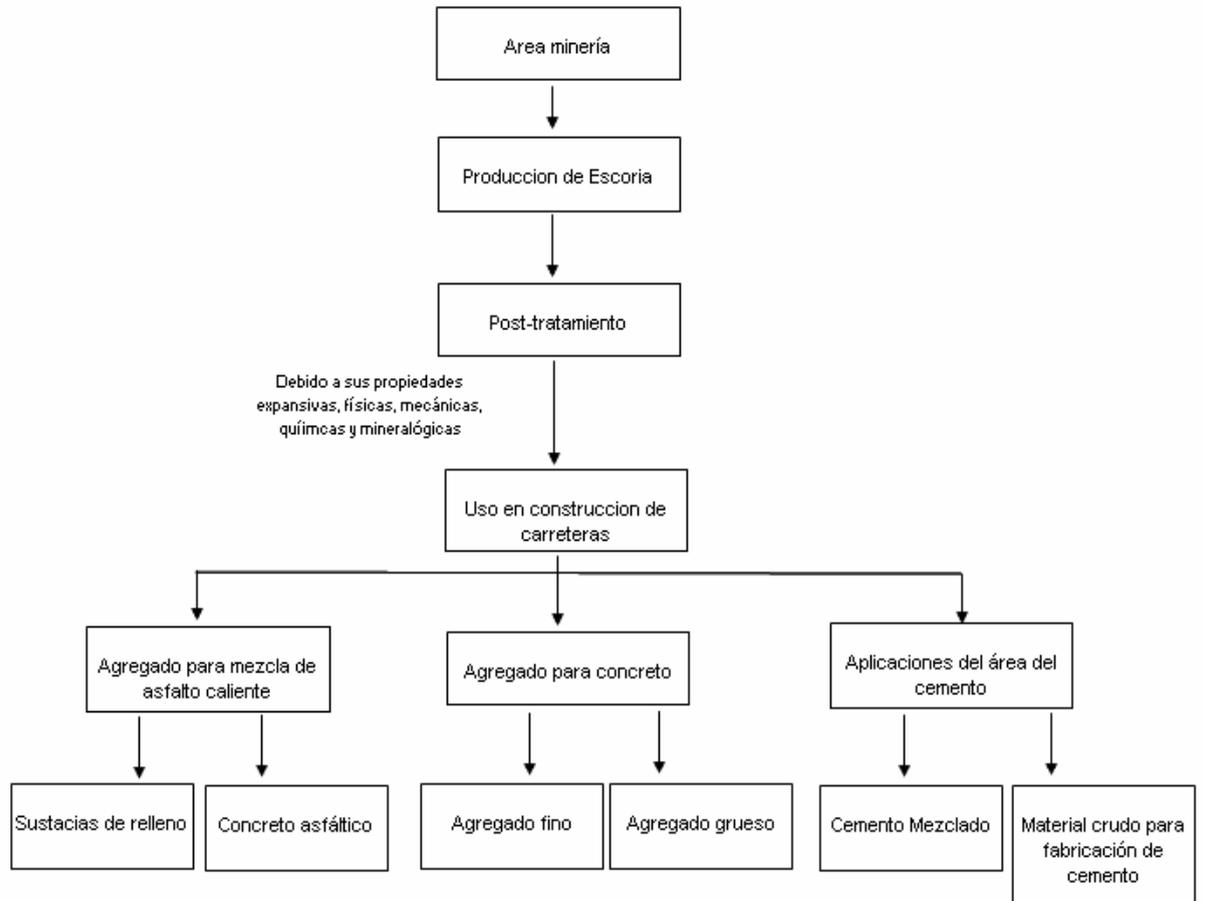


Figura 8.2. 1 Principales productos obtenidos a partir de escoria para el área de la construcción.



Figura 8.2.2 Goethita

8.3 Anexos Metodología Experimental

Figura 8.3. 1 Composición química de escoria utilizada en experimentos

Elemento	Fórmula	Concentración
		% en peso
Azufre	S	0,46
Cobre	Cu	0,81
Potasio	K	0,52
Hierro	Fe total	46,14
Silicio	SiO ₂	25,93
Plomo	Pb	0,03
Aluminio	Al	1,88
Calcio	Ca	0,68
Molibdeno	Mo	0,18
Sodio	Na	0,38
Magnesio	Mg	0,49
Titanio	Ti	0,69
Cobre Soluble (H ₂ SO ₄)	Cu	0,25
Hierro Soluble (H ₂ SO ₄)	Fe	20,35
Cobre Soluble (H ₂ O)	Cu	0,001
Hierro Soluble (H ₂ O)	Fe	0,033

Figura 8.3. 2 Grado liberación, asociación y oclusión de hierro en escoria

TOTAL ESPECIES DE HIERRO					
Intervalos	Mallas Tyler	Liberado	Asociado	Ocluido	TOTAL
(micrones)	(aprox.)	%	%	%	%
0 - 10			19,28	62,81	82,10
10 - 20		1,73	4,02	4,41	10,16
20 - 30	-400	0,68		1,74	2,42
30 - 40			0,67	1,68	2,35
40 - 50			0,58		0,58
50 - 60	+400 -250			0,58	0,58
60 - 70					
70 - 80	+250 -170				
80 - 90					
90 - 100		0,66			0,66
100 - 120	+170 -100				
120 -140					
140 - 160				0,61	0,61
160 - 200	100			0,55	0,55
TOTAL		3.07	24,56	72,37	100,00
TAMAÑO en μ m					
Promedio Calculado		34	8	10	10
Máximo Observado		97	44	158	158
Mínimo Observado		12	12	2	2

Figura 8.3. 3 Distribución granulométrica de escoria inicial

MALLA	TAMAÑO	PESO	PESO	RETENIDO	RETENIDO
		PARCIAL	ACUMULADO	PARCIAL	ACUMULADO
No.	μm	g	g	%	%
5	4000	116,29	116,29	11,63	11,63
7	2800	144,56	260,85	14,46	26,09
10	2000	178,73	439,58	17,88	43,97
18	1000	372,15	811,73	37,22	81,19
20	850	86,90	898,63	8,69	89,88
40	425	88,14	986,77	8,82	98,70
70	212	8,98	995,75	0,90	99,59
100	150	0,05	995,80	0,01	99,60
140	106	0,00	995,80	0,00	99,60
170	90	0,00	995,80	0,00	99,60
200	75	0,00	995,80	0,00	99,60
270	53	0,00	995,80	0,00	99,60
<270	<53	4,00	999,80	0,40	100,00

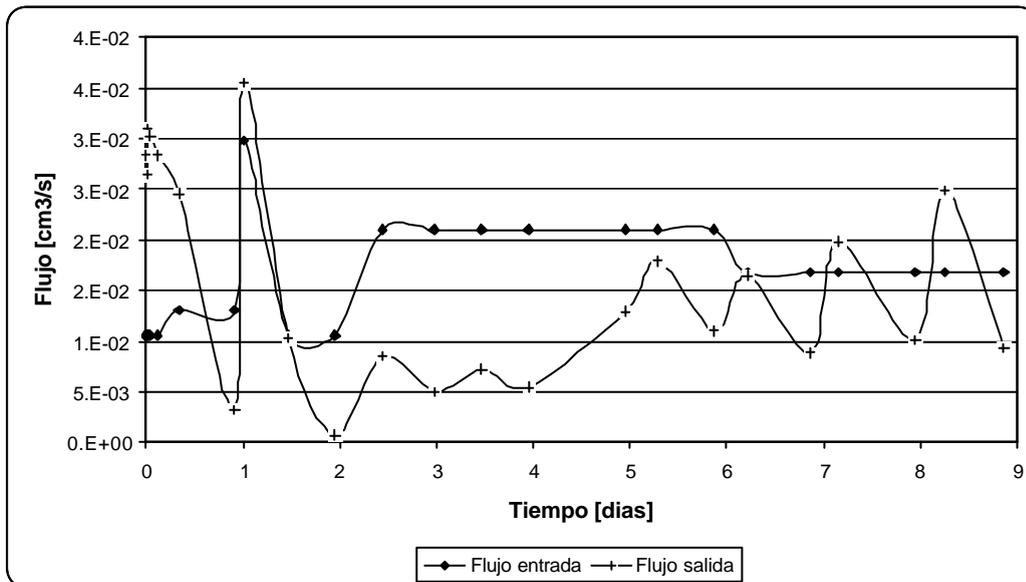


Figura 8.3. 4 Variación del flujo entrada/salida real en etapa de lixiviación

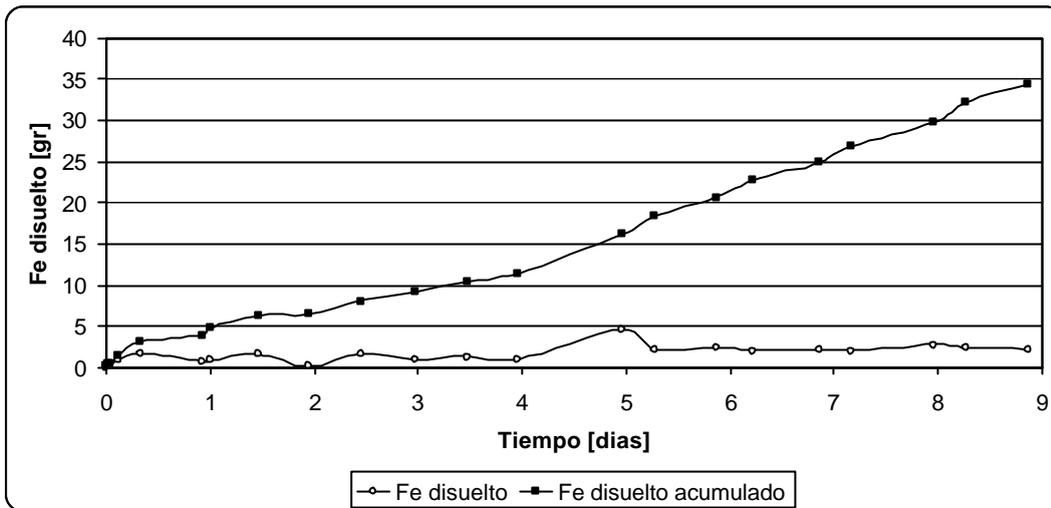
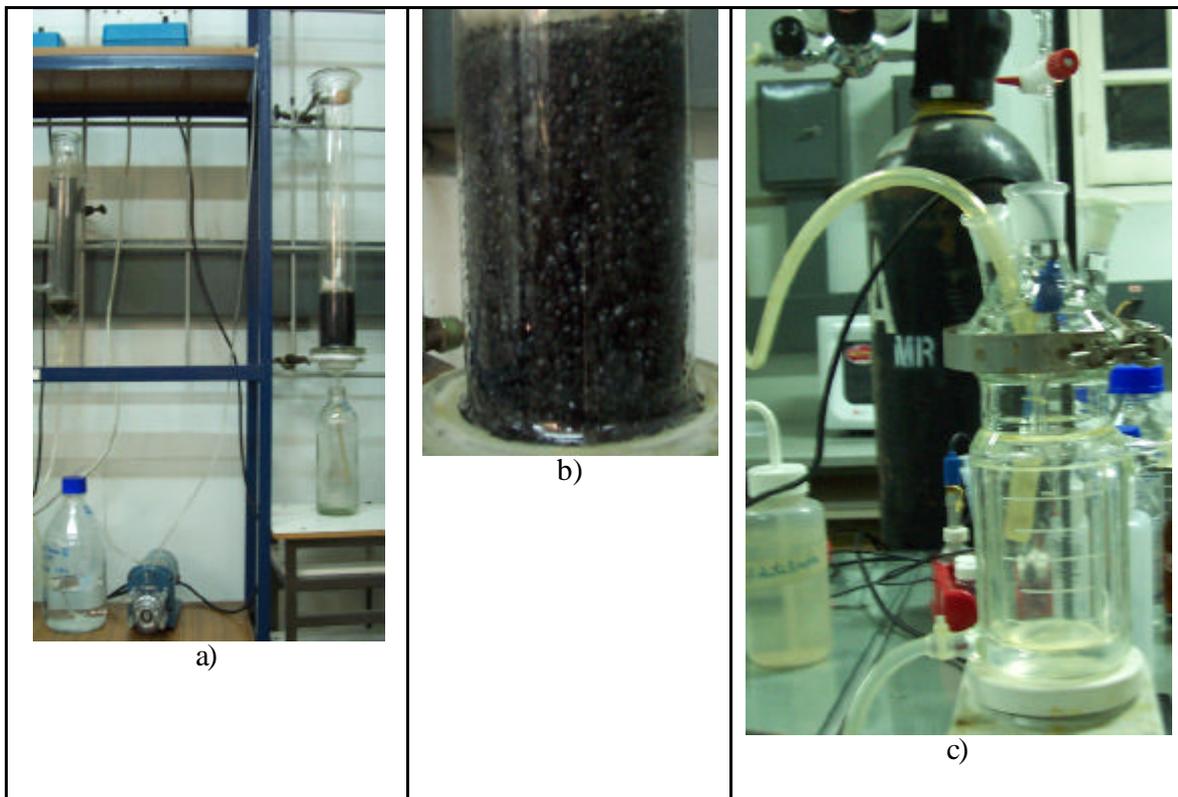


Figura 8.3. 5 Hierro disuelto en solución a la salida de etapa de lixiviación

Figura 8.3. 6 Disposición sistema experimental

a) Sistema Lixiviación; b) Escoria en columna; c) Reactor Cristalización y Precipitación



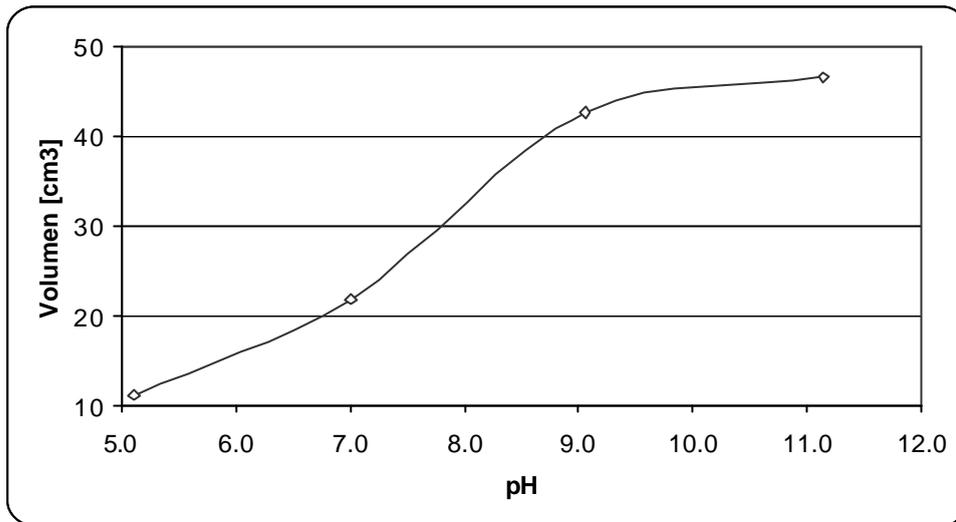


Figura 8.3. 7 Consumos de NaOH en etapa de Precipitación

Figura 8.3. 8 Porcentaje de distintos elementos sólidos precipitados a distintos pH _{finales} trabajados

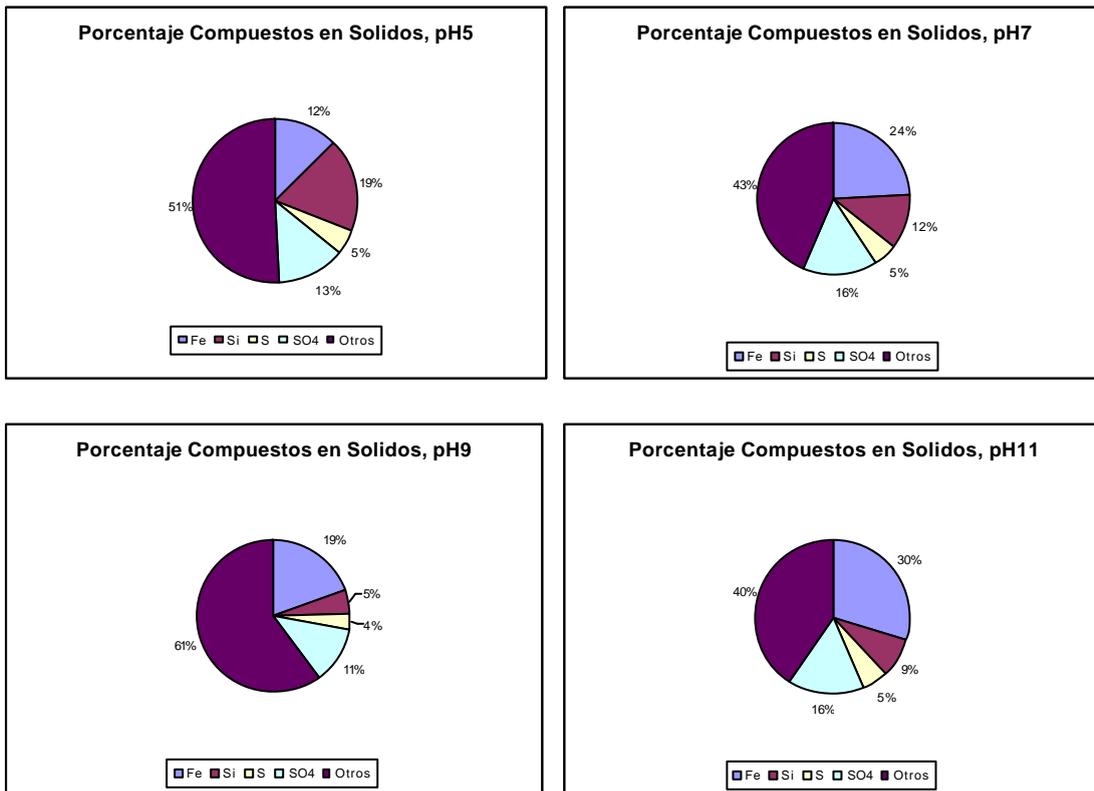


Figura 8.3. 9 Datos obtenidos en cinética de lixiviación 0,1M

DATOS ENTRADA					DATOS SALIDA									
Tiempo	Tasa de flujo [l/h/m ²]	H2SO4, libre (método Grann)	eh	pH	Tasa de Riego salida	Volumen colectado	Densidad [gr./cm ³]	Masa solución	Fe(tot)	Fe(III)	Si	pH	Eh	Acidez Total (método Grann)
[día]		g/L	mV		L/h/m ²	calculado, cm ³		colectada, g	g/L	g/L	g/L		mV	
0,1	8,6	-	-	-	-	114,5	-	-	20,61	-	5,63	-	-	-
0,0	8,6	10,5	425,2	0,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,0	8,6	10,5	425,2	0,95	23,1	8,5	1,73	9	10,30	-	-	-	-	-
0,0	8,6	10,5	425,2	0,95	21,6	15,9	1,03	16,4	8,12	-	-	2,45	342,9	-
0,0	8,6	10,5	425,2	0,95	25,3	28,0	1,03	28,9	5,55	-	-	2,02	356,0	-
0,0	8,6	10,5	425,2	0,95	24,7	54,6	1,02	55,9	4,61	0,36	-	2,09	354,8	-
0,1	8,6	10,5	425,2	0,95	23,1	203,8	1,01	206,3	4,09	0,30	1,18	1,98	355,9	0
0,3	10,7	10,5	425,2	0,95	20,0	441,0	1,02	451,3	3,94	0,25	1,04	1,99	380,6	0
0,9	10,7	10,5	425,2	0,95	2,6	160,2	1,04	166,2	4,27	0,28	1,03	2,56	369,7	0
1,0	24,3	12,5	467	0,98	29,0	273,2	1,02	277,4	3,15	0,24	0,77	1,66	386,8	-
1,5	8,7	12,5	467	0,98	8,4	409,8	1,02	416,5	3,79	0,27	1,14	1,97	379,1	0
2,0	8,7	12,5	467	0,98	0,6	30,2	1,03	31,1	4,82	-	-	-	-	-
2,5	17,1	12,5	467	0,98	7,0	370,8	1,01	376,2	4,27	0,29	0,97	2,68	360,4	0
3,0	17,1	12,5	467	0,98	4,1	227,8	1,03	234,8	4,61	0,25	1,03	2,93	353,6	0
3,5	17,1	12,5	467	0,98	5,9	308,0	1,01	312	4,42	0,26	0,93	2,60	357,2	0
4,0	17,1	10,9	485,8	0,99	4,4	228,4	1,03	234,9	4,42	0,29	0,96	2,54	362,7	0
5,0	17,1	10,9	485,8	0,99	10,5	1113,6	1,01	1122	4,18	0,25	0,92	2,27	363,1	0
5,3	17,1	10,9	485,8	0,99	14,6	510,9	1,02	521,6	4,27	0,22	1,03	2,42	359,9	0
5,9	17,1	9,5	486,7	0,98	9,0	559,4	1,03	577,9	4,30	0,25	0,95	2,37	353,7	0
6,2	13,6	9,5	486,7	0,98	13,5	491,2	1,00	489,7	4,18	0,24	0,95	2,16	368,8	0
6,9	13,6	9,2	482,7	0,98	7,2	494,7	1,01	501,1	4,39	0,25	0,92	2,11	367,8	0
7,2	13,6	9,2	482,7	0,98	16,1	516,5	1,00	518	3,90	0,23	0,84	1,93	369,0	0
8,0	13,6	9,2	482,7	0,98	8,3	697,6	0,98	684,3	3,99	0,22	0,81	1,96	364,7	0
8,3	13,6	9,4	508,4	1,01	20,3	670,6	0,97	648,5	3,63	0,19	0,78	1,69	375,8	0
8,9	13,6	9,37	508,4	1,01	7,6	484,3	1,02	493,5	4,60	0,23	0,74	1,99	361,9	0

Figura 8.3. 10 Cálculos experimentales a partir de cinética de la Lixiviación 0,1M

CÁLCULOS									
Tiempo	Consumo de Ácido				Extracción Fe				Extracción Si
	kg H ₂ SO ₄ parcial/ton escoria	kg H ₂ SO ₄ acumulado/ton escoria	kg H ₂ SO ₄ parcial kg Fe tot disuelto Lixiviado	kg H ₂ SO ₄ acumulado kg Fe tot disuelto Lixiviado	kg Fe tot disuelto parcial/ton escoria	kg Fe tot disuelto acumulado/ton escoria	% (Fe disuelto g*100/Fe escoria g[1])	% (Fe disuelto g*100/Fe escoria g[2])	
[día]	-	-	-	-	-	-	[1] Fe escoria = Fe soluble en H ₂ SO ₄	[2] Fe escoria = Fe tot en escoria	
0,1									
0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,0	0,17	0,1	1,88	0,1	0,09	0,09	0,04	0,02	-
0,0	0,32	0,2	2,38	0,3	0,13	0,20	0,11	0,05	-
0,0	0,56	0,3	3,48	0,6	0,16	0,30	0,19	0,08	-
0,0	1,09	0,6	4,19	1,2	0,26	0,51	0,32	0,14	-
0,1	4,06	2,2	4,72	3,4	0,86	1,31	0,74	0,33	0,25
0,3	8,78	4,8	4,90	8,3	1,79	3,05	1,61	0,71	0,47
0,9	3,19	1,7	4,52	10,1	0,71	4,02	1,96	0,87	0,17
1,0	6,47	3,5	7,29	13,1	0,89	3,85	2,40	1,06	0,22
1,5	9,71	5,3	6,07	17,6	1,60	6,23	3,18	1,41	0,48
2,0	0,71	0,4	4,77	17,9	0,15	8,07	3,25	1,44	-
2,5	8,79	4,8	5,38	22,0	1,63	8,79	4,05	1,79	0,37
3,0	5,40	2,9	4,99	24,6	1,08	10,56	4,58	2,03	0,24
3,5	7,30	4,0	5,19	28,0	1,40	11,55	5,27	2,33	0,29
4,0	4,74	2,6	4,55	30,5	1,04	12,59	5,78	2,56	0,23
5,0	23,09	12,5	4,81	42,8	4,80	16,70	8,14	3,60	1,06
5,3	10,59	5,8	4,71	48,4	2,25	19,29	9,24	4,09	0,54
5,9	10,06	5,5	4,06	54,6	2,48	21,91	10,46	4,63	0,55
6,2	8,83	4,8	4,18	60,0	2,11	23,40	11,49	5,09	0,48
6,9	8,62	4,7	3,85	65,5	2,24	26,84	12,59	5,57	0,47
7,2	9,00	4,9	4,33	71,2	2,08	25,95	13,61	6,02	0,45
8,0	12,16	6,6	4,23	78,9	2,87	29,42	15,02	6,65	0,59
8,3	11,92	6,5	4,75	86,3	2,51	29,23	16,25	7,19	0,54
8,9	8,61	4,7	3,74	91,6	2,30	39,39	17,37	7,69	0,37

Figura 8.3. 11 Datos y cálculos para cristalización c on solución ferrosa lixiviada 0,1 M

Volumen total usado para cristalizar	Densidad solución con cristales	Fe(tot) en muestra para cristalización (inicial)	Fe(III) en muestra para cristalización (inicial)	Fe(tot) solución filtrada (final)	Fe(III) solución filtrada (final)	pH solución final filtrada	Masa Muestra analizada	Fe en solución	Fe en sólidos
cm ³	g/cm ³	g/L	g/L	g/L	g/L		g	g/L	%
618,50	1,35	4,05	0,26	3,01	0,21	-1,27	4,03	2,53	0,23

Si en solución	Si en sólidos	Sulfatos en solución (SO4 ⁻)	Sulfatos en sólidos (SO4 ⁻)	S en sólidos	kg Fe Cristalizado/m ³ solución tratada	kg Si cristalizado/m ³ solución tratada	kg S cristalizado/m ³ solución tratada	kg SO4 cristalizado/m ³ solución tratada	kg H ₂ O consumido/m ³ solución tratada
g/L	%	g/L	%	%					
0,00	0,92	733,62	64,55	23,09	0,01	0,06	1,50	4,21	994,45

kg H ₂ SO ₄ consumido/m ³ solución tratada	kg Fe disuelto/m ³ solución tratada	kg Si disuelto/m ³ solución tratada	kg SO ₄ disuelto/m ³ solución tratada	Masa inicial sólidos a secar	Masa final sólidos secos	Contenido Agua en muestra a secar	Masa Final solución filtrada	Densidad Final solución filtrada	Volumen solución filtrada
				g	g		g	g/cm ³	cm ³
1060,58	2,89	0,00	839,45	349,18	56,26	292,92	985,15	1,39	707,72

Figura 8.3. 12 Datos y cálculos para cristalización con solución ferrosa lixiviada 1M

Fe tot por muestra	Volumen total usado para cristalizar	Fracción Volumétrica en muestra	Densidad solución con cristales	Entrada		
				Fe(tot) en muestra para cristalización (inicial)	Si(tot) en muestra para cristalización (inicial)	Acidez libre solución entrada
g/L	cm ³		g/cm ³	g/L	g/L	g/L
23,42	251,46	1,00	1,44	31,80	5,00	44,69

Salida									
pH solución final filtrada	Masa Muestra analizada	Acidez libre solución filtrada	Fe en solución	Fe en sólidos	Si en solución	Si en sólidos	Sulfatos en solución (SO ₄ ²⁻)	Sulfatos en sólidos (SO ₄ ²⁻)	S en sólidos
	g	g/L	g/L	%	g/L	%	g/L	%	%
<0	2,00	736,96	5,88	21,14	0,001	1,13	769,36	47,20	17,37

Cálculos								
Sólidos						Solución		
kg Fe cristalizado/m ³ solución	kg Si cristalizado/m ³ solución	kg S cristalizado/m ³ solución	kg (SO ₄ ²⁻) cristalizado/m ³ solución	kg H ₂ SO ₄ agregado /m ³ solución tratada	kg ácido en solución residual recuperado/m ³ solución tratada	kg Fe disuelto/m ³ solución tratada	kg Si disuelto/m ³ solución tratada	kg (SO ₄ ²⁻) disuelto/m ³ solución tratada
1,68	0,09	1,38	3,75	1043,48	301,08	2,40	0,0004	314,32

Masa inicial sólidos a secar	Masa final sólidos secos	Contenido Agua en muestra a secar	Masa Final solución filtrada	Densidad Final solución filtrada	Volumen solución filtrada
g	g	g	g	g/cm ³	cm ³
432,68	429,00	3,68	143,00	1,39	102,73

Figura 8.3. 13 Datos y cálculos para precipitación con solución ferrosa lixiviada 0,1 M

Nombre Experimento	Volumen usado para solución de precipitación	Fe(tot) en muestra para precipitación inicial	Consumo de NaOH	pH solución inicial	pH solución final	Masa solución final	Volumen solución Final	Densidad solución final	kg Fe precipitado/m ³ solución
	cm ³	g/L	cm ³			g	cm ³	g/cm ³	
pH final 5 + N ₂	250,00	4,18	11,10	2,54	5,11	259,85	289,37	0,90	0,59
pH final 7 + N ₂	250,00	4,18	21,90	2,53	7,01	269,84	266,11	1,01	1,13
pH final 9 + N ₂	250,00	4,18	42,60	2,42	9,06	290,96	285,25	1,02	0,92
pH final 11 + N ₂	250,00	4,22	46,60	2,47	11,14	293,58	292,99	1,00	1,40
pH final 5 + O ₂	250,00	4,27	32,20	2,50	4,99	279,44	274,50	1,02	1,38

Nombre Experimento	kg Si precipitado/m ³ solución	kg H ₂ O consumido/m ³ solución tratada	ácido en solución residual recuperado/m ³ solución tratada	kg S precipitado/m ³ solución	kg SO ₄ ²⁻ precipitado/m ³ solución tratada	kg Fe disuelto/m ³ solución tratada	kg Si disuelto/m ³ solución tratada	kg SO ₄ ²⁻ disuelto/m ³ solución tratada	Masa inicial sólidos a secar
									g
pH final 5 + N ₂	0,88	994,45	0,00	0,23	0,61	3,72	0,01	7,76	33,00
pH final 7 + N ₂	0,88	994,45	0,00	0,37	1,15	2,10	0,01	7,80	39,91
pH final 9 + N ₂	0,36	994,45	0,00	0,27	0,83	0,00	0,01	6,50	78,22
pH final 11 + N ₂	0,53	994,45	0,00	0,33	0,99	0,00	0,01	6,05	93,46
pH final 5 + O ₂	0,57	994,45	0,00	0,33	0,99	0,87	0,01	6,30	61,60

(continuación datos de Figura 8.3.13)

Nombre Experimento	% sólidos en solución que entra a filtración	Masa final sólidos secos	% humedad sólidos para etapa de secado	Contenido Agua en muestra a secar	Masa Final solución filtrada	Volumen solución filtrada	Densidad solución filtrada	Acidez solución Final (no filtrada)	pH solución Final (filtrada)
pH final 5 + N ₂	12,70	g 1,11	96,65	g 31,89	g 226,85	cm ³ 225,50	g/cm ³ 1,01	g/L 0,00	unidades pH 2,92
pH final 7 + N ₂	14,79	1,94	95,13	37,97	229,93	228,11	1,01	0,00	3,18
pH final 9 + N ₂	26,88	5,22	93,33	73,00	212,74	211,89	1,00	0,00	6,57
pH final 11 + N ₂	12,70	3,40	96,65	90,06	200,12	200,12	1,00	0,00	9,12
pH final 5 + O ₂	22,04	2,49	95,96	59,11	217,84	221,38	0,98	0,00	3,33

Nombre Experimento	Acidez solución Final (filtrada)	Masa de sólidos analizada	Fe (total) en solución	Fe en sólidos	Si en solución	Si en sólidos	Sulfatos en solución SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ en sólidos	S (total) en sólidos
	g/L	g	g/L	%	g/L	%	g/L	%	%
pH final 5 + N ₂	0,00	1,18	4,12	12,45	0,01	18,59	8,61	12,96	4,85
pH final 7 + N ₂	0,00	1,85	2,30	24,04	0,01	11,91	8,55	15,51	5,00
pH final 9 + N ₂	0,00	1,81	0,00	19,44	0,01	5,04	7,67	11,44	3,70
pH final 11 + N ₂	0,00	1,56	0,00	29,70	0,01	8,56	7,56	15,84	5,28
pH final 5 + O ₂	0,00	1,55	0,98	29,17	0,01	9,21	7,11	16,04	5,35

Nombre Experimento	kg NaOH consumido/m ³ solución tratada	kg pulpa/m ³ solución tratada	kg solución residual/m ³ solución tratada	Masa sólidos filtrados antes de secar (kg/m ³ solución tratada)	Masa sólidos filtrados después de secar (kg/m ³ solución tratada)
pH final 5 + N ₂	94,57	1039,40	907,40	132,00	4,42
pH final 7 + N ₂	186,59	1079,36	919,72	159,64	7,77
pH final 9 + N ₂	362,95	1163,84	850,96	312,88	20,88
pH final 11 + N ₂	397,03	1174,32	800,48	373,84	13,59
pH final 5 + O ₂	274,34	1117,76	871,36	246,40	9,96

Figura 8.3. 14 Resultados de DRX para sólidos pH_{final} 9

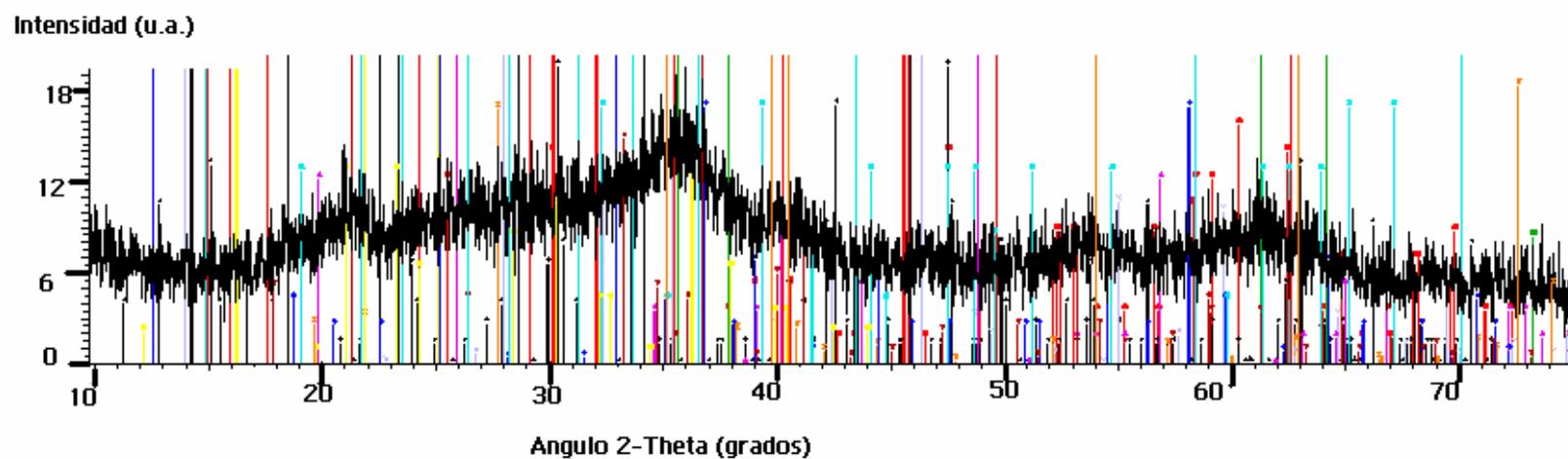


Figura 8.3. 15 Resultados de DRX para sólidos pH_{final} 11

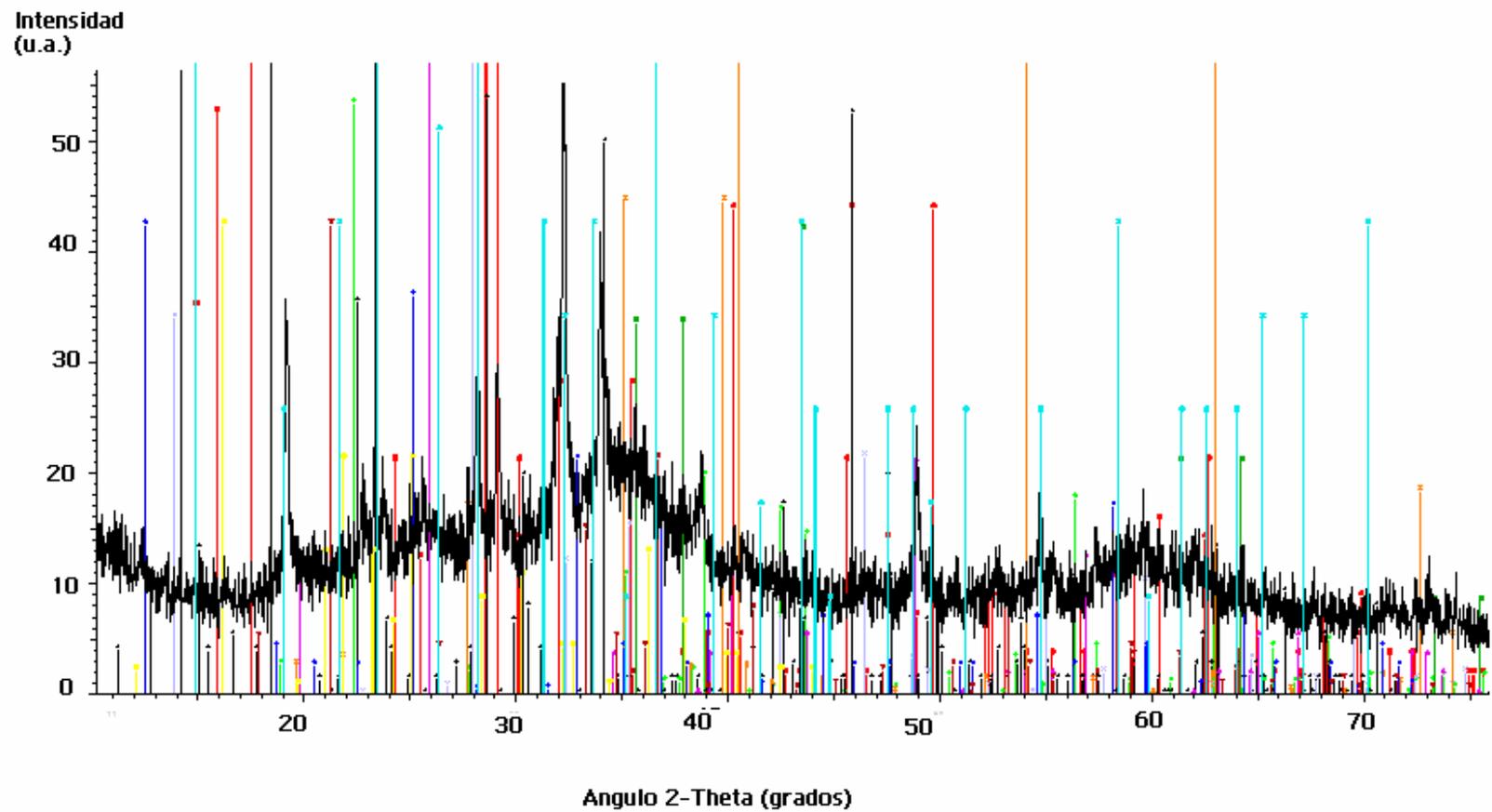


Figura 8.3. 16 Resultados de DRX para sólidos $\text{pH}_{\text{final}} 5$ + oxidación de solución

Intensidad (u.a.)

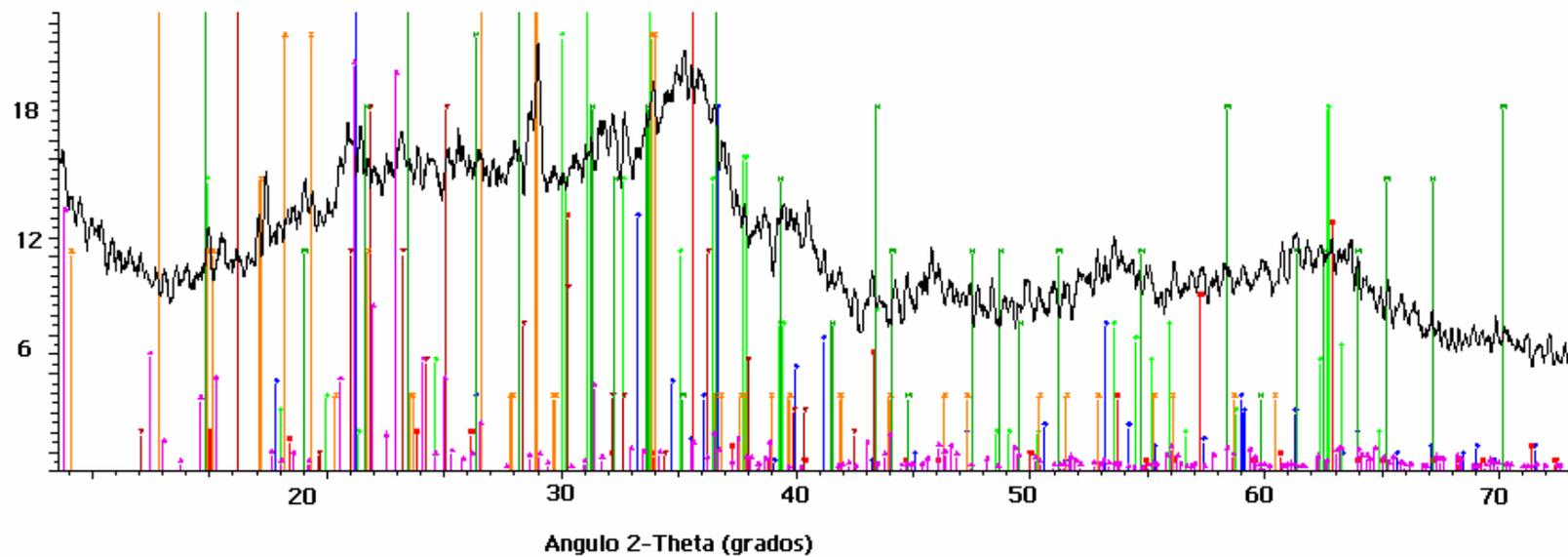
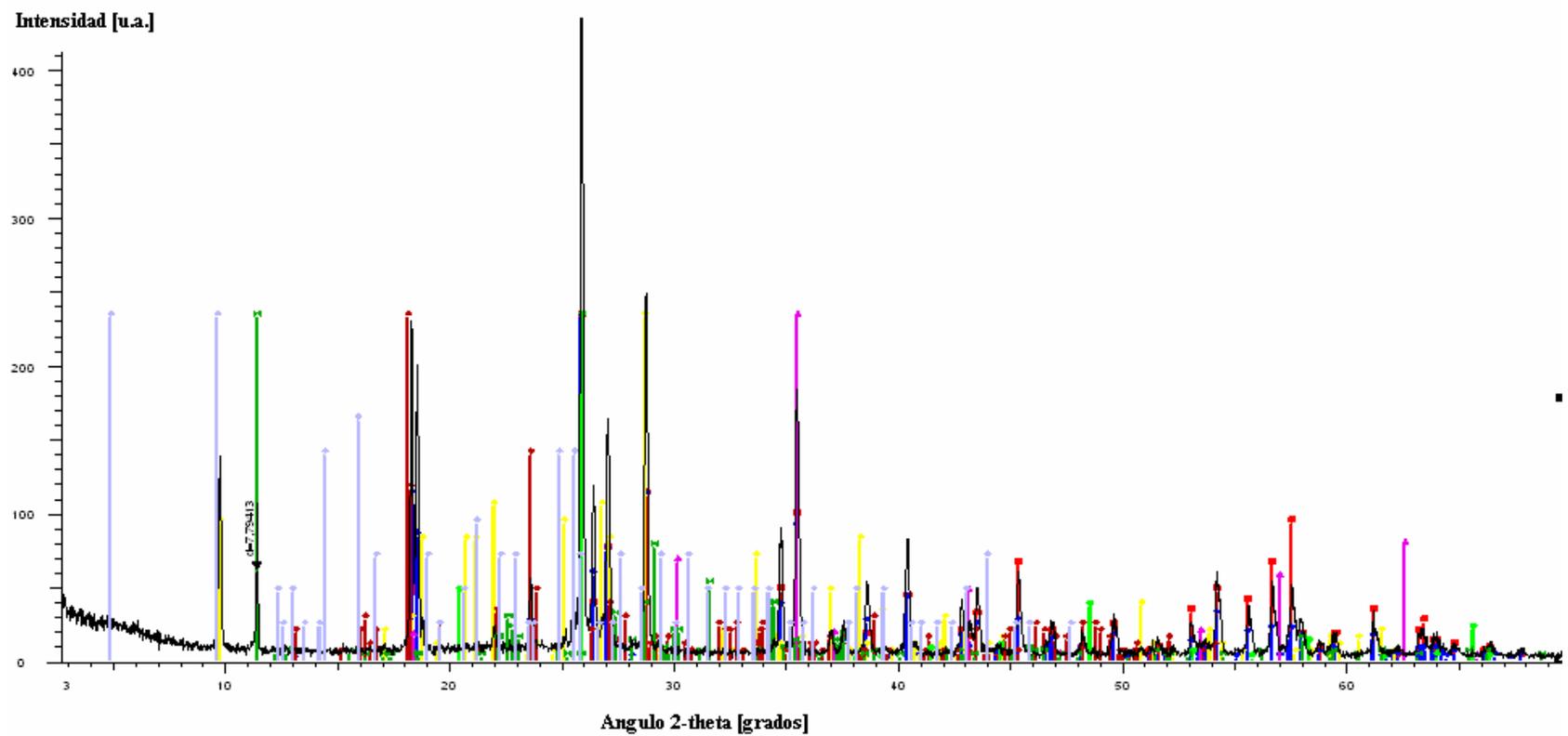


Figura 8.3. 17 Resultados de DRX para sólidos de cristalización



8.4 Anexos Diseño Conceptual

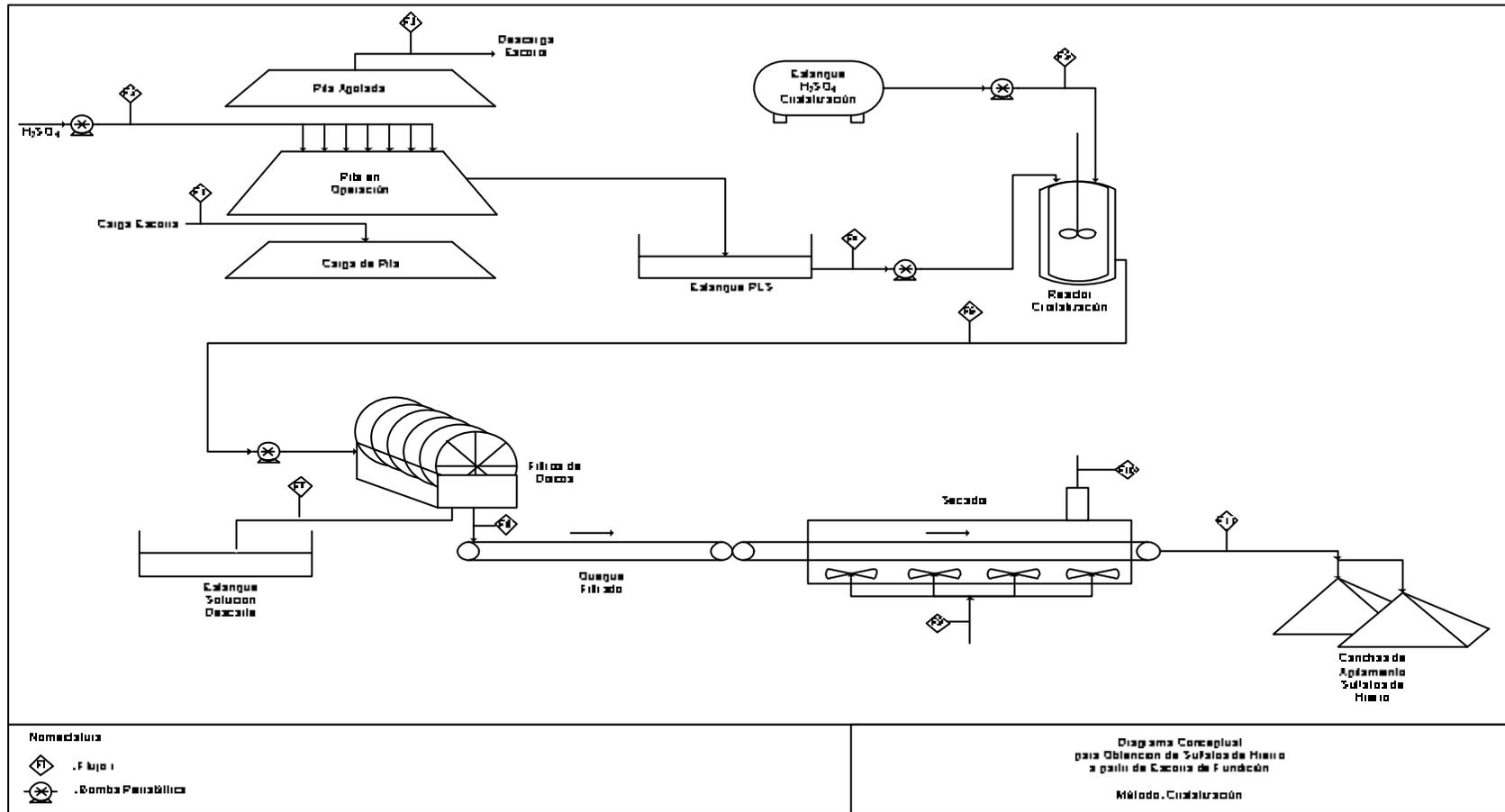


Figura 8.4. 2 Balances de masa para proceso de cristalización de sulfatos de hierro, etapa lixiviación

Solución Acida de Ácido sulfúrico	1	M
Densidad Ácido sulfúrico	1.84	g/L
Peso Molecular Ácidosulfúrico	98.1	g/mol
Tasa Riego Entrada	10	L/h/m ²
Área Pila	110	m ²
Tasa de Riego Salida	9.8	L/h/m ²
Altura	2	m

VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE			
		1	2	3	4
		PULPA			
Temperatura	°C	20±1	20±1	20±1	20±1
Flujo Másico pulpa	ton/día	-	-	-	-
Densidad de la pulpa	ton/m ³	-	-	-	-
Flujo Volumétrico	m ³ /día	-	-	-	-
Contenido de Sólidos	%p/p	-	-	-	-
Razón Sólido/Líquido	masa/vol.	-	-	-	-
		SOLUCIÓN			
Flujo Másico de Líquido	ton/día	-	1,30	-	1,28
Densidad de la solución	ton/m ³	-	0,001	-	0,001
Flujo Volumétrico	m ³ /día	-	1296	-	1270
Protones Disueltos, H+(libre)	g/L	-	10,7	-	0
Hierro Total Disuelto, Fe(tot)	g/L	-	0	-	4,0
Silicio Disuelto, Si(tot)	g/L	-	0	-	0,9
Otros Compuestos Disueltos	g/L	-	0	-	0
H ₂ SO ₄ disuelto	g/L	-	10,22	-	0
Sólidos Suspendidos	mg/L	-	0	-	0
pH	----	-	0,98	-	2,1
Potencial Redox, Eh	m V	-	480,6	-	363,3

VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE			
		1	2	3	4
		SÓLIDO			
Masa de Sólidos [ton]	ton	100	-	92,5	-
Flujo másico	ton/día	1	-	1	-
Densidad del sólido	ton/m ³	2,09	-	2,09	-
Humedad en base seca	%p/p	1,72	-	0,70	-
Contenido Azufre, S	%p/p	0,46	-	0,56	-
Contenido Hierro, Fe	%p/p	46,16	-	46,31	-
Contenido Silicio, Si	%p/p	25,93	-	28,03	-
Contenido de Otros	%p/p	27,44	-	25,10	-
Contenido de Fe soluble en H ₂ SO ₄	%p/p	20,35	-	25,14	-
		GAS			
Flujo Másico	ton/día	-	-	-	-
Densidad del sólido	ton/m ³	-	-	-	-
Flujo Volumétrico	m ³ /día	-	-	-	-

Figura 8.4. 3 Balances de masa para proceso de cristalización de sulfatos de hierro, etapa cristalización, filtrado, secado

VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE							
		4	5	6	7	8	9	10	11
		PULPA							
Temperatura	°C	20±1	20±1	25±1	20±1	20±1	40±1	40±1	20±1
Masa pulpa	kg	-	-	57235,0	-	-	-	-	-
Densidad de la pulpa	kg/m ³	-	-	1440,0	-	-	-	-	-
Volumen	m ³	-	-	39,7	-	-	-	-	-
Flujo	m ³ /día	-	-	940,3	-	-	-	-	-
Contenido de Sólidos	%p/p	-	-	75,0	-	-	-	-	-
Razón Sólido/Líquido	masa/vol.	-	-	1080,0	-	-	-	-	-
		SOLUCION							
Masa de Líquido	kg solución	-	26087,50	-	14217,5	-	-	-	-
Densidad de la solución	kg/m ³	0,001	1840,00	-	1390,0	-	-	-	-
Volumen líquido	m ³	-	14,18	-	10,2	-	-	-	-
Flujo Volumétrico	m ³ /día	600	340,3	-	245,5	-	-	-	-
Protones Disueltos, H+(libre)	g/L	45	98,1	-	--	-	-	-	-
Hierro Total Disuelto, Fe(tot)	g/L	31,8	0	-	15,0	-	-	-	-
	kg/día	-	0	-	1440,0	-	-	-	-
	kg Fe disuelto	-	0	-	60,0	-	-	-	-
Silicio Disuelto, Si(tot)	g/L	2,11	0	-	0,001	-	-	-	-
	kg/día	-	0	-	0,240	-	-	-	-
	kg Si disuelto	-	0	-	0,010	-	-	-	-
Sulfatos Disueltos	g/L	99,50	0	-	733,6	-	-	-	-
	kg/día	-	0	-	188592,0	-	-	-	-
	kg SO ₄ ²⁻ disuelto	-	0	-	7858,0	-	-	-	-
Otros Compuestos Disueltos	g/L	-	0	-	--	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ disuelto	g/L	0	98,1	-	--	-	-	-	-
Sólidos Suspendidos	mg/L	-	0	-	0,00	-	-	-	-
pH	----	2,1	<0	-	-1,27	-	-	-	-
Potencial Redox, Eh	mV	-	-	-	--	-	-	-	-

VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE							
		4	5	6	7	8	9	10	11
		SÓLIDO							
Densidad del sólido	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad en base seca	%p/p	-	-	-	-	10	-	-	0
Flujo Másico	kg/día	-	-	-	-	5300	-	-	4769,6
Contenido Azufre, S	%p/p	-	-	-	-	2,78	-	-	17,37
	kg/día	-	-	-	-	-	-	-	828
	kg S	-	-	-	-	-	-	-	34,5
Contenido Hierro, Fe	%p/p	-	-	-	-	3,38	-	-	21,1
	kg/día	-	-	-	-	-	-	-	1008,0
	kg Fe	-	-	-	-	-	-	-	42
Contenido Silicio, Si	%p/p	-	-	-	-	0,18	-	-	1,13
	kg/día	-	-	-	-	-	-	-	54,0
	kg Si	-	-	-	-	-	-	-	2,25
Contenido de Sulfatos, SO ₄ ²⁻	%p/p	-	-	-	-	7,55	-	-	47,2
	kg/día	-	-	-	-	-	-	-	2250,0
	kg SO ₄ ²⁻	-	-	-	-	-	-	-	93,8
Contenido de Otros	%p/p	-	-	-	-	86,11	-	-	13,2
		GAS							
Flujo Másico Aire	ton/día	-	-	-	-	-	346	9122	-
Masa de solución proveniente de sólidos	ton/día	-	-	-	-	-	-	8776	-
Densidad del gas	kg/m ³	-	-	-	-	-	1,30	130	-
Flujo Volumétrico Aire	m ³ /día	-	-	-	-	-	266153,85	7016592	-

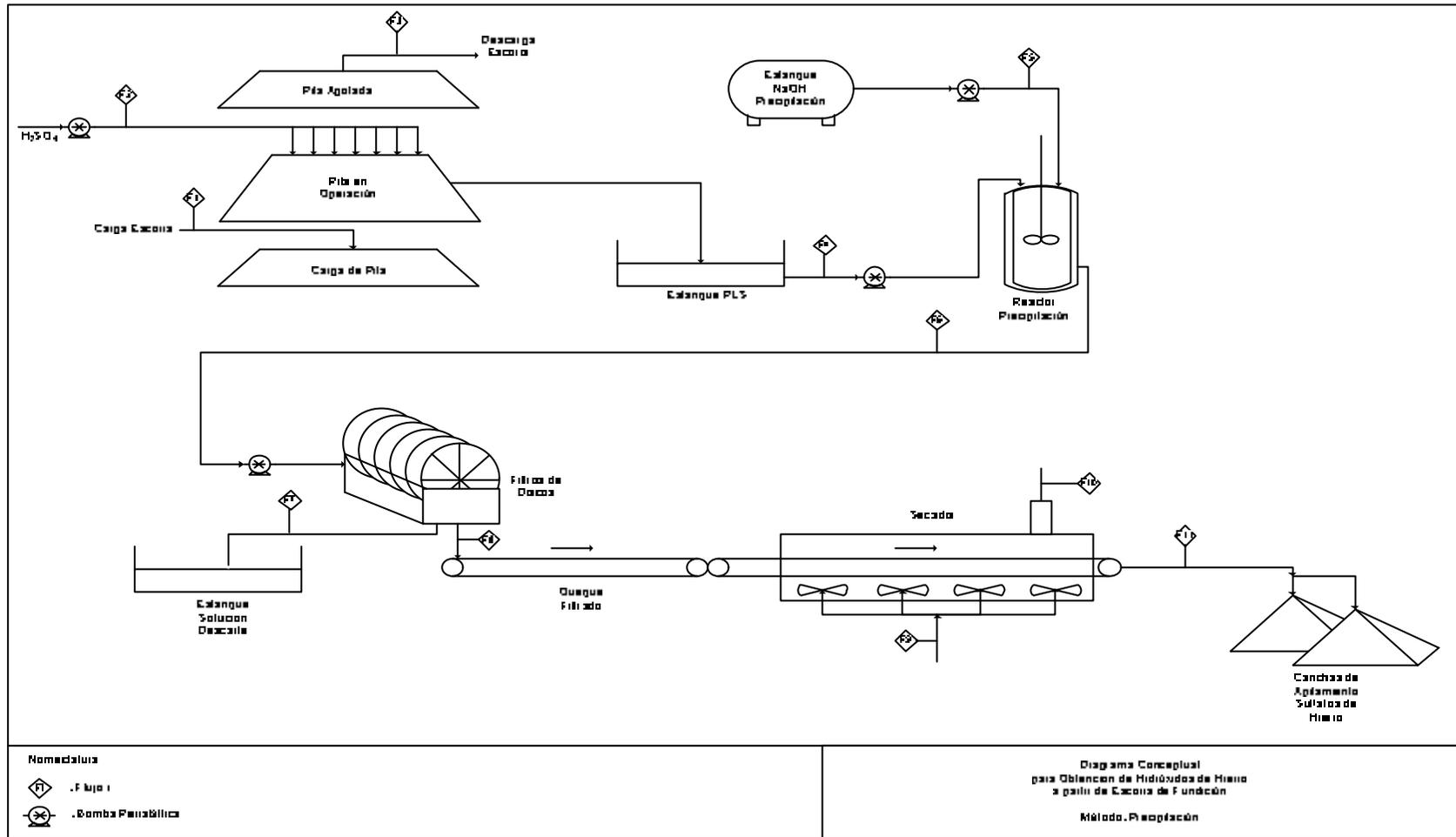


Figura 8.4. 5 Balances de masa para producción de hidróxidos de hierro, etapa lixiviación

Solución Ácida de Ácido sulfúrico	0,1	M
Densidad Ácido sulfúrico	1,84	g/L
Peso Molecular Ácido sulfúrico	98,1	g/mol
Tasa Riego Entrada	10	L/h/m ²
Área Pila	225	m ²
Tasa de Riego Salida	9,8	L/h/m ²
Altura	2	m

VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE			
		1	2	3	4
PULPA					
Temperatura	°C	20±1	20±1	20±1	20±1
Flujo Másico pulpa	ton/día	-	-	-	-
Densidad de la pulpa	ton/m ³	-	-	-	-
Flujo Volumétrico	m ³ /día	-	-	-	-
Contenido de Sólidos	%p/p	-	-	-	-
Razón Sólido/Líquido	masa/vol.	-	-	-	-
SOLUCION					
Flujo Másico de Líquido	ton/día	-	1,30	-	1,28
Densidad de la solución	ton/m ³	-	0,001	-	0,001
Flujo Volumétrico	m ³ /día	-	1296	-	1270
Protones Disueltos, H+(libre)	g/L	-	10,7	-	0
Hierro Total Disuelto, Fe(tot)	g/L	-	0	-	4,0
Silicio Disuelto, Si(tot)	g/L	-	0	-	0,9
Otros Compuestos Disueltos	g/L	-	0	-	0
H ₂ SO ₄ disuelto	g/L	-	10,22	-	0
Sólidos Suspendidos	mg/L	-	0	-	0
pH	----	-	0,98	-	2,1
Potencial Redox, Eh	m V	-	480,6	-	363,3

(Continuación Figura 8.4.5)

VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE			
		1	2	3	4
		SÓLIDO			
Masa de Sólidos [ton]	ton	100	-	92.5	-
Flujo másico	ton/día	1	-	1	-
Densidad del sólido	ton/m³	2,09	-	2,09	-
Humedad en base seca	%p/p	1,72	-	0,70	-
Contenido Azufre, S	%p/p	0,46	-	0,56	-
Contenido Hierro, Fe	%p/p	46,16	-	46,31	-
Contenido Silicio, Si	%p/p	25,93	-	28,03	-
Contenido de Otros	%p/p	27,44	-	25,10	-
Contenido de Fe soluble en H₂SO₄	%p/p	20,35	-	25,14	-
		GAS			
Flujo Másico	ton/día	-	-	-	-
Densidad del sólido	ton/m³	-	-	-	-
Flujo Volumétrico	m³/día	-	-	-	-

Figura 8.4. 6 Balances de masa para producción de hidróxidos de hierro, etapa precipitación, filtrado, secado

VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE							
		4	5	6	7	8	9	10	11
		PULPA							
Temperatura	°C	20±1	20±1	25±1	20±1	20±1	40±1	40±1	20±1
Masa pulpa	kg	-	-	116380,0	-	-	-	-	-
Densidad de la pulpa	kg/m ³	-	-	1020,0	-	-	-	-	-
Volumen	m ³	-	-	114,1	-	-	-	-	-
Flujo	m ³ /día	-	-	1404,5	-	-	-	-	-
Contenido de Sólidos	%p/p	-	-	27,0	-	-	-	-	-
pH	--	-	-	9,1	-	-	-	-	-
Razón Sólido/Líquido	masa/vol.	-	-	275,4	-	-	-	-	-
		SOLUCION							
Masa de Líquido	kg solución		36300,0	-	85100,0	-	-	-	-
Densidad de la solución	kg/m ³	0,001	2130,0	-	1000,0	-	-	-	-
Volumen líquido	m ³	--	17,04	-	85,1	-	-	-	-
Flujo volumétrico	m ³ /día	1200	204,5		1021,2		-	-	-
Normalidad NaOH	N		1	-	--	-	-	-	-
Hierro Total Disuelto, Fe(tot)	g/L	4	0	-	0,0	-	-	-	-
	kg/día	-	0	-	0,0		-	-	-
	kg Fe disuelto	-	0	-	0,0	-	-	-	-
Silicio Disuelto, Si(tot)	g/L	0,9	0	-	0,008	-	-	-	-
	kg/día	-	0	-	8,400		-	-	-
	kg Si disuelto	-	0	-	0,700	-	-	-	-
Sulfatos Disueltos	g/L	-	0	-	7,7	-	-	-	-
	kg/día	-	0	-	7800,0		-	-	-
	kg SO ₄ ²⁻ disuelto	-	0	-	650,0	-	-	-	-
Otros Compuestos Disueltos	g/L	-	0	-	--	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ disuelto	g/L	-	0,0	-	--	-	-	-	-
pH	----	2,1	<0	-	6,57	-	-	-	-
Potencial Redox, Eh	m V	363,30	-	-	--	-	-	-	-

(continuación Figura 8.4.6) VARIABLE	UNIDAD	CORRIENTE							
		4	5	6	7	8	9	10	11
		SÓLIDO							
Densidad del sólido	kg/m ³	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad en base seca	%p/p	-	-	-	-	93	-	-	0
Flujo Másico	kg/día					102978	-	-	7208,5
Contenido Azufre, S	%p/p	-	-	-	-	0,25	-	-	3,7
	kg/día					-	-	-	324
	kgS	-	-	-	-	-	-	-	27
Contenido Hierro, Fe	%p/p	-	-	-	-	1,30	-	-	19,4
	kg/día					-	-	-	1104,0
	kg Fe/m ³ solución tratada	-	-	-	-	-	-	-	0,92
	kg Fe	-	-	-	-	-	-	-	92
Contenido Silicio, Si	%p/p	-	-	-	-	0,34	-	-	5,0
	kg/día					-	-	-	432,0
	kg Si/m ³ solución tratada	-	-	-	-	-	-	-	0,36
	kg Si	-	-	-	-	-	-	-	36
Contenido de Sulfatos, SO ₄ ²⁻	%p/p	-	-	-	-	0,76	-	-	11,4
	kg/día					-	-	-	996,0
	kg SO ₄ ²⁻ /m ³ solución tratada	-	-	-	-	-	-	-	0,8
	kg SO ₄ ²⁻)	-	-	-	-	-	-	-	83,0
Contenido de Otros	%p/p	-	-	-	-	97,36	-	-	60,38
		GAS							
Flujo Másico Aire	ton/día	-	-	-	-	-	346	350781	-
Masa de solución proveniente de sólidos	kg/m ³ solución tratada	-	-	-	-	-	-	3504	-
	ton/día	-	-	-	-	-	-	350435,48	-
Densidad del gas	kg/m ³	-	-	-	-	-	1,30	1,30	-
Flujo Volumétrico Aire	m ³ /día	-	-	-	-	-	266154	269831911	-

Figura 8.4. 7 Cálculos para pureza de cristales

PM Compuesto			Estequiométrico						Medido	
			% Fe (II)	% Fe(III)	% S	% O	% H	Tota	% Fe	% S
277,8	Melanterita	FeSO ₄ *7H ₂ O	20,1	0,0	11,5	63,4	5,0	100	21,1	17,37
169,8	Szomohokite	FeSO ₄ *H ₂ O	32,9	0,0	18,8	47,1	1,2	100		
169,8	Sulfato de hierro hidratado	Fe(SO ₄)H ₂ O	0,0	32,9	18,8	47,1	1,2	100		
320,8	Rhomboclase	FeH(SO ₄) ₂ *4H ₂ O	0,0	17,4	20,0	59,9	2,8	100		
1249	Copiapita	FeFe ₄ (SO ₄) ₆ (OH) ₂ *20H ₂ O	4,5	17,9	15,4	58,9	3,4	100		
		PM g/mol	55,8	55,8	32,0	16,0	1,0			
fracción en sólido total			Estequiométrico					Medido		
			% Fe (II)	% Fe(III)	% S	% O	% H	% Fe	% S	
0,3	Melanterita	FeSO ₄ *7H ₂ O	6,0	0,0	3,5	19,0	1,5	21,1	17,37	
0,2	Szomohokite	FeSO ₄ *H ₂ O	6,6	0,0	3,8	9,4	0,2			
0,05	Sulfato de hierro hidratado	Fe(SO ₄)H ₂ O	0	1,6	0,9	2,4	0,1			
0,1	Rhomboclase	FeH(SO ₄) ₂ *4H ₂ O	0	1,7	2,0	6,0	0,3			
0,05	Copiapita	FeFe ₄ (SO ₄) ₆ (OH) ₂ *20H ₂ O	0,2	0,9	0,8	2,9	0,2			
0,3	Otros (SiO ₂ , Fe ₃ O ₄)	-	-	-	-	-	-			
1	Total		12,8	4,3	10,9	39,7	2,3			
		Pureza	81,0		62,9					

8.5 Fórmulas utilizadas para cálculos

%Extracción de Fe por solución

$$\% Fe = \frac{Fe_{T_{disuelto}}}{Fe_{T_{cabeza_analizada}}} * 100$$

%Extracción de Fe por sólidos

$$\% Fe = \frac{(masa_{escoria_cabeza} * Fe_{T_{cabeza_analizada}} - masa_{escoria_agotada} * Fe_{T_{escoria_agotada}})}{masa_{escoria_cabeza} * Fe_{T_{cabeza_analizada}}} * 100$$

%Extracción de Fe cabeza calculada

$$\% Fe = \frac{Fe_{T_{disuelto}}}{\left(\frac{\sum Fe_{disuelto} + Fe_{T_{escoria_agotada}}}{masa_{escoria_cabeza}} \right) * masa_{escoria_cabeza}} * 100$$