

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

TESIS

**ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE CONSUMO DE
ÁCIDO SULFÚRICO Y LA LIXIVIACIÓN DE
MINERALES OXIDADOS DE COBRE
(YACIMIENTO MELTRAL 1, SAMA INCLÁN – TACNA)**

Presentada por:

Bach. Rossel Wilson Mamani Huanca

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2 018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales


**ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE CONSUMO DE
ÁCIDO SULFÚRICO Y LA LIXIVIACIÓN DE
MINERALES OXIDADOS DE COBRE**

(YACIMIENTO MELTRAL 1, SAMA INCLÁN – TACNA)

TESIS

Tesis sustentada el día 13 de octubre de dos mil diecisiete por el Bachiller Rossel Wilson Mamani Huanca, siendo el Jurado Calificador integrado por:


PRESIDENTE


.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

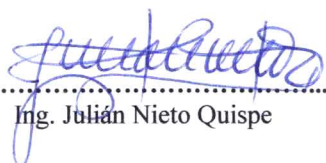
SECRETARIO


.....
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

VOCAL


.....
MSc. Matías Carlos Vivar Colquicocha

ASESOR


.....
Ing. Julián Nieto Quispe

DEDICATORIA

Este presente trabajo dedico a mis padres y hermanos y una persona en especial porque me brindaron su apoyo tanto moral y económicamente para seguir estudiando y lograr el objetivo trazado para un futuro mejor y ser orgullo para ellos y de toda mi familia, a todos y cada uno de ellos les dedico cada una de estas páginas de mi tesis.

AGRADECIMIENTO

A mis maestros que, en este andar por la vida, influyeron con sus lecciones y experiencias en formarme como una persona de bien y preparada para los retos que pone la vida.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRAC	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problemática de la investigación	4
1.2. Formulación del problema	5
1.3. Justificación e importancia	6
1.4. Objetivos de la investigación	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Variables	7

1.5.1. Identificación de las variables	7
1.5.2. Caracterización de las variables	8
1.6. Hipótesis de la investigación	8
1.6.1. Hipótesis general	8
1.6.2. Hipótesis específicas	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes del estudio	10
2.2. Bases teóricas	11
2.2.1. Mercado del cobre	11
2.2.2. Fundamentos de la lixiviación del cobre	12
2.2.3. Métodos de lixiviación	12
2.3. Características de los minerales de cobre	15
2.4. Minerales de cobre	15
2.5. Ganga en el mineral	16
2.6. Importancia de la química de las soluciones, de la termodinámica y de la cinética en hidrometalurgia	20
2.7. Elementos de cinética química aplicables en hidrometalurgia	22
2.8. Factores que influyen sobre la cinética	27
2.9. Modelo cinético del núcleo sin reaccionar	31

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1.	Tipo y diseño de la investigación	43
3.2.	Muestra	43
3.3.	Equipos, materiales y reactivos	44
3.4.	Operacionalización de las variables	46
3.5.	Métodos y procedimientos	47
3.6.	Procedimiento experimental de lixiviación	47
3.6.1.	Lixiviación en botella	47
3.6.2.	Lixiviación en columna	50
3.7.	Determinación de cobre en solución	55
3.8.	Determinación de ácido en solución	56

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.	Caracterización mineralógica del mineral oxidado de cobre	57
4.2.	Análisis químico del mineral oxidado de cobre	58
4.3.	Análisis físico del mineral oxidado de cobre	58
4.4.	Lixiviación en botella	62
4.5.	Lixiviación en columna	65
4.6.	Modelo matemático (lixiviación en columnas)	73

CONCLUSIONES	78
---------------------	----

RECOMENDACIONES	80
------------------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
-----------------------------------	----

ANEXOS	83
---------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Óxidos de cobre, presentes en minerales mixtos	16
Tabla 2. Principales minerales consumidores de ácido y sus características de neutralización	20
Tabla 3. Mineralogía de los óxidos de cobre	57
Tabla 4. Análisis químico del mineral oxidado de cobre (Leyes g/t y en %)	58
Tabla 5. Análisis físico del mineral oxidado de cobre	58
Tabla 6: Análisis granulométrico 100 % -m 1” mineral oxidado de cobre	59
Tabla 7. Análisis granulométrico 100 % -m ¾” mineral oxidado de cobre	59
Tabla 8. Análisis granulométrico 100 % - m ½”	60
Tabla 9. Parámetros de las pruebas de lixiviación en botellas	63
Tabla 10: Resultados de las pruebas	63
Tabla 11. Condiciones de la prueba 1 en columna (-m ¾”)	65
Tabla 12. Resultados de las pruebas en columna –m ½” (100 % pasante)	66
Tabla 13. Balance metalúrgico por soluciones de prueba 2	67
Tabla 14. Resultados de las pruebas en columna – m ¾” (100 % pasante)	68
Tabla 15. Balance metalúrgico por soluciones de prueba 3	69
Tabla 16. Resultados de las pruebas en columna – m 1” (100 % pasante)	70
Tabla 17. Modelo cinético de núcleo sin reaccionar	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mecanismo de lixiviación de una partícula de mineral	32
Figura 2. Velocidad de lixiviación en la superficie de reacción	33
Figura 3. Control difusional a través de la capa de ceniza	35
Figura 4. Control químico	40
Figura 5. Mineral oxidado de cobre	44
Figura 6. Mineral oxidado de cobre aglomerado	54
Figura 7. Columna de lixiviación	55
Figura 8. Mineral oxidado de cobre del yacimiento Meltral 1, Sama Inclán	57
Figura 9. Curva de análisis granulométrico 100 % - m 0,0127 (-m 1/2")	61
Figura 10. Curva de análisis granulométrico 100 % - m 0,019 (-m 3/4")	61
Figura 11. Curva de análisis granulométrico 100 % - m 0,0250 (-m 1")	62
Figura 12. Extracción de cobre de minerales oxidados de cobre (a)	64
Figura 13. Extracción de cobre de minerales oxidados de cobre (b)	64
Figura 14. Prueba 1, curva de extracción de cobre	71
Figura 15. Prueba 2, curva de extracción de cobre	72
Figura 16. Prueba 3, curva de extracción de cobre	72
Figura 17. Curva de modelo cinético núcleo sin reaccionar "control difusional" en la extracción de cobre	76

Figura 18. Curva modelo cinético núcleo sin reaccionar “control químico” en la extracción del cobre

77

RESUMEN

El presente trabajo es desarrollado en el laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería, la lixiviación de minerales oxidados de cobre, de la **zona de Sama Inclán**, tiene por finalidad de evaluar el consumo de ácido y la solubilidad del cobre. Las especies mineralógicas en mayor proporción son las siguientes: crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y malaquita [$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$], y en menor proporción azurita [$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$], pirita (FeS_2) y cuprita (Cu_2O). Como resultado principal del estudio se encontró que la velocidad de consumo de ácido y de disolución de cobre aumenta a medida que se disminuye el tamaño de grano en el rango de 1,27 cm ($\frac{1}{2}$ ") – 2,54 (1"). También se comprobó que la cinética del proceso está controlada por la difusión de protones, en el interior de las partículas en el todo el rango de acidez estudiado. El valor del tiempo de reacción completa está dado por cinética de lixiviación de cobre alcanzando una recuperación hasta el 86,93 % a los 30 días de tratamiento con el mineral de 0,0127 m ($\frac{1}{2}$ ").

ABSTRACT

The present work is developed in the metallurgy laboratory of the engineering faculty, the leaching of oxidized copper minerals from the area of Sama Inclin, aims to see the acid consumption and the solubility of copper. The mineralogical species are the following: chrysocolla ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and malachite [$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$], and to a lesser extent azurite [$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$], pyrite (FeS_2) and cuprite (Cu_2O). As a main result of this study it was established that the rate of consumption of acid and copper dissolution increased as the grain size decreased the $\frac{1}{2}$ " - 1" range. It was verified that the kinetics of the process is controlled by the diffusion of protons, inside the particles in the whole range of acidity studied. The value of the complete reaction time is given by copper leaching kinetics reaching recovery to 86,93 % at 30 days of $\frac{1}{2}$ " ore treatment.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las técnicas de lixiviación, han evolucionado con ayuda de equipos sofisticados adaptados a las necesidades de la industria; ya que, por la formación del yacimiento, el tipo de explotación y la ley del mineral se enfocan a extraer valores metálicos de minerales más complejos y de baja ley; por lo que se tratan volúmenes cada vez mayores.

En respuesta a esta necesidad, se requiere menor tiempo de lixiviación con aceptable recuperación y lograr una concentración adecuada de la solución rica, por lo que se requieren equipos e instrumentación cada vez más autónomos, que a su vez permitan abatir costos.

El medio de lixiviación para minerales de cobre consiste de una solución acuosa de ácido sulfúrico. En ocasiones se usan otros agentes como: NH_3 , HNO_3 , HCl , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y CuCl_2 para minerales o concentrados de cobre. Las ventajas principales del ácido sulfúrico consisten en su bajo costo, su acción rápida sobre minerales oxidados de cobre y el hecho de que se regenera cuando se lixivian minerales de sulfato; determinada por el consumo de ácido sulfúrico y el grado de

extracción de cobre. Se sabe que un aumento en la concentración de ácido en las soluciones lixiviantes impulsa una mayor recuperación de cobre, pero también se produce un elevado consumo de ácido por especies reactivas de la ganga, lo que repercute negativamente en la economía del proceso.

La lixiviación ácida es el proceso más utilizado para la recuperación de cobre desde minerales oxidados. Por estudios anteriores se sabe que la rentabilidad de esta operación va a estar influenciada por una adecuada selección del nivel de concentración de ácido. Con pruebas experimentales es posible encontrar el consumo óptimo de ácido en el proceso. Por tal motivo, el objetivo principal de este trabajo es identificar y estudiar los mecanismos involucrados en las cinéticas del consumo de ácido y de disolución del cobre de un mineral al variar la concentración de ácido sulfúrico en la solución lixiviante.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

La lixiviación de cobre en la minería presenta diversos inconvenientes, tanto respecto de los procesos empleados como respecto a los efectos que a partir de aquella son generados. Precisamente la industrialización de este proceso en el ámbito de la minería ha recurrido a la utilización del ácido sulfúrico como lixivante, lo cual genera un impacto ambiental particularmente dañino debido a su alto poder contaminante. A su vez, dicho ácido resulta especialmente riesgoso para todos aquellos individuos que deben realizar operaciones y faenas en los que éste es utilizado. Su empleo, asimismo no permite reutilizar el agua empleada en el proceso, generando con ello costos adicionales y mayor contaminación por desechos. Por otra parte, el método de lixiviación de cobre actualmente empleado en la minería hace imposible una recuperación eficiente del mineral de cobre quedado en las pilas de lixiviación, haciendo de este un procedimiento ineficiente y conforme a lo señalado de altos costos asociados. De esta forma y considerando lo conocido en el estado de la técnica, es posible advertir que la

lixiviación de cobre en la minería resulta compleja, costosa, altamente contaminante y con resultados hasta ahora ineficientes.

En la actualidad, el cobre continúa experimentado una importante demanda, la cual se estima permanecerá en aumento no sólo debido a los múltiples campos en los que como metal puede ser empleado, sino que a su potencial de utilización para diversos y continuos desarrollos tecnológicos e industriales en áreas como la electrónica, la informática, las comunicaciones, fabricación de cañerías, paneles solares, industria automotriz y transferencia de energía de potencia entre otros, haciendo de éste uno de los metales mayormente requeridos. De esta forma contar con procedimientos eficientes para la producción de cobre en cuanto a: reducir costos, no degradar el medio ambiente, brindar mayor seguridad operacional y que logren optimizar su capacidad productiva, resulta primordial para la industria minera y en definitiva para la economía mundial.

1.1.2. Problemática de la investigación

La lixiviación ácida es el proceso más utilizado para la recuperación de cobre desde minerales oxidados. La rentabilidad de esta operación va a estar determinada por el consumo de ácido sulfúrico y el grado de extracción de cobre. Se sabe que un aumento en la concentración de ácido en las soluciones lixiviantes impulsa una mayor recuperación de cobre, pero también se produce un elevado

consumo de ácido por especies reactivas de la ganga, lo que repercute negativamente en la economía del proceso. De estudios anteriores se sabe que con una adecuada selección del nivel de concentración de ácido es posible optimizar el consumo de ácido en el proceso.

1.2. Formulación del problema

Las primordiales dificultades que presenta un área de lixiviación, está en plasmar los planes de producción, ya sean estos a corto o mediano plazo. Esto se relaciona con la inconsistencia entre las características de los materiales que envía la mina y lo que se planifico previamente, así como también la inconsistencia frecuente entre la respuesta real de la planta.

La dinámica en un proceso de lixiviación es comparativamente lenta y depende de diversas variables como la tasa de riego, entre otras, que influyen directamente en la respuesta a corto plazo. Por lo antepuesto, es ventajosa la realización de pruebas en columna con los minerales a lixiviar, para de esta manera poder determinar el consumo de ácido en el tratamiento, lo cual nos va permitir controlar las demás variables, obteniendo soluciones cargadas con buena cantidad cobre y contenidos bajos de impureza.

1.3. Justificación e importancia

En la actualidad una cantidad significativa de minerales oxidados de cobre puede estar íntimamente asociada con sulfuros, por lo cual recibe el nombre de minerales complejos. La mayoría de las veces, la lixiviación de estos minerales requiere largos periodos de lixiviación y desafortunadamente bajas recuperaciones de cobre.

El conocimiento del uso de otras tecnologías como la biolixiviación para el tratamiento de los llamados minerales sulfurados nos ayudará a reducir y/o a minimizar dichos problemas. Dichas tecnologías de una u otra manera facilitan la conversión de los compuestos presentes, de manera que faciliten la liberación de las partículas metálicas; para luego, entrar en contacto íntimo con la solución lixivante.

Razón por la cual, el presente trabajo de tesis tiene como objetivo conocer la cinética de lixiviación de minerales oxidados para el tratamiento adecuado de estos minerales de la zona.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General:

Estudio de la cinética del consumo de ácido y de la disolución del cobre de mineral oxidado de cobre de la zona de Sama Inclán -Tacna, mediante la lixiviación en columna.

1.4.2. Objetivos Específicos:

- 1) Determinar el consumo de ácido del mineral oxidado de cobre.
- 2) Estudio de la cinética de disolución del mineral oxidado de cobre a diferentes granulometrías.
- 3) Determinar las etapas controlantes de la lixiviación de mineral de la cinética de disolución de cobre.

1.6. Variables

1.6.1. Identificación de las variables

- Tiempo de aglomeración
- Concentración de la solución lixivante
- Tiempo de lixiviación
- Recuperación (%)
- Granulometría
- Dosificación de la solución lixivante

- Caudal de riego

1.6.2. Caracterización de las variables:

a) Variables independientes

- Concentración de la solución lixivante (g/l)
- Granulometría (mm)
- Tiempo de aglomeración (h)
- Tiempo de lixiviación (h)

b) Variables dependientes

- Recuperación (%)

1.7. Hipótesis de la investigación

1.7.1. Hipótesis general

Es posible conocer la cinética de lixiviación de minerales oxidados de cobre considerando las variables como el tiempo, concentración de la solución lixivante, flujo de riego y en especial la granulometría de mineral.

1.7.1 Hipótesis específica

Es posible conocer la cinética de lixiviación de minerales oxidados de cobre considerando las variables como el tiempo, concentración de la solución lixivante, flujo de riego y en especial la granulometría de mineral:

- a) Si se considera la recuperación de cobre dentro un rango de 90 a 95 % en lixiviación, con ácido sulfúrico.
- b) Si utilizamos la tecnología de precipitación de cobre nos permitirá obtenerla lixiviación ácida, en el proceso nos permitirá obtener la recuperación de cobre adecuada desde minerales oxidados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Desde la década de 1980 emergen plantas hidrometalúrgicas de envergadura tales como: Cajamarquilla, Cerro Verde, planta de agua de mina de Cerro de Pasco, Yanacocha y otros en nuestro país. Actualmente se tienen plantas de lixiviación de minerales de cobre, tanto de naturaleza oxidada y sulfurada como:

- Pampa de Cobre S.A.: Planta de lixiviación en pad, trata mineral oxidado de cobre, ubicado en Moquegua.
- Sociedad Minera Cerro Verde S.A.: Planta de lixiviación en pad, trata mineral oxidado de cobre, ubicado en Arequipa.
- Southern Copper Corporation S.A.: Planta de lixiviación en pad, trata mineral oxidado de cobre, ubicado en Moquegua. Planta de lixiviación en botaderos, trata mineral sulfurado de cobre, ubicado en Tacna.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Mercado del cobre

El empleo de cobre en la actualidad es tal, que se ha estimado que el consumo mundial per cápita ha alcanzado los 3 kilogramos por año (considerando una población de 6,000 millones de personas), además se debe tener en cuenta que es el tercer metal más utilizado por el hombre, después del hierro y el aluminio.

El auge que vive el cobre es un fenómeno relativamente actual, ya que el desarrollo económico junto a la revolución industrial comenzó aproximadamente en 1750, pero el impacto en el mercado del cobre se sintió recién por lo menos cien años más tarde.

El cobre se ha utilizado desde que el hombre manipula herramientas o armas, pero hasta antes de 1800 su consumo no era mayor que el del imperio romano hace más de 2000 años antes (Revista chilena de ingeniería, 2013).

El mercado internacional del cobre actualmente se encuentra viviendo una época de recuperación de precios y se espera años de bonanza, presentando indicadores que apuntan a una alta demanda a nivel mundial, sumado a precios

cada vez más atractivos y estables. El impulso actual del mercado del cobre se debe en gran medida al aumento en el consumo en Asia, especialmente en China (a partir de 1990 la demanda de China por cobre ha aumentado a un ritmo regular), así como también se pronostica un leve crecimiento en América del Norte, América del Sur, Oceanía y África, mientras que Europa tiende a una caída en la demanda del metal.

2.2.2. Fundamentos de la lixiviación del cobre

La lixiviación consiste en la disolución de la especie de interés del mineral, por acción de un agente lixivante externo o proporcionando directamente por el mineral en condiciones apropiadas. Los procesos de lixiviación dependiendo de las condiciones de concentración del mineral (concentrado, mineral de alta o baja ley), y de sus características químicas y mineralógicas (sulfuros, óxidos o mixtos) se pueden efectuar en los siguientes tipos de procesos.

2.2.3. Métodos Lixiviación.

El mineral forma un lecho fijo de partículas que es irrigado por una solución. El agente lixivante entra en contacto con el lecho mineral y a medida que desciende va disolviendo el metal de interés. La solución rica se recoge en la base del lecho y luego pasa a la etapa de extracción. Si es por agitación la solución se obtiene filtrando la pulpa. En este grupo de procesos, se pueden distinguir:

- a) **Lixiviación en lugar (in place o in situ):** involucra la lixiviación de una mena fracturada en el yacimiento. La mena puede ser mineral de baja ley no extraído en la explotación del yacimiento y dejando en el lugar, o también cuerpos mineralizados que no pueden ser explotados por métodos convencionales. La zona a lixiviar puede ser superficies o subterráneas. Los tiempos de lixiviación son de varios meses hasta años.
- b) **Lixiviación en bateas:** Consiste en contactar un lecho mineral con una solución que percola e inunda la batea, que está provista de un fondo falso cubierto con medio filtrante. La geometría del lecho la establece la batea. Este proceso es efectivo en aquellos casos donde el mineral a lixiviar presente características especiales como alta ley de óxidos y mineralización expuesta, alta porosidad, baja generación de fino durante el chancado y el ataque químico, baja retención de humedad y mínima comparación de lecho. Los ciclos de lixiviación en este caso son de varios días.
- c) **Lixiviación en botaderos:** El método es aplicado para minerales de cobre de leyes marginales (menor que 0,4 % de Cu), manejando así grandes volúmenes de material que son depositados sobre la topografía existente en la zona, aprovechando a las pendientes para el drenaje natural de soluciones. La solución lixivante es aplicada sobre la superficie, mediante un sistema de distribución percolando por gravedad. El tiempo de lixiviación es de varios años, con recuperación entre un 20 % y 50 % (A. Ortiz Martínez, 2012).

- d) **Lixiviación en pilas:** se basa en la percolación de la solución lixivante a través de un mineral chancado y apilado, el que está formando una pila sobre un terreno previamente impermeabilizado. La base de la pila tiene una pendiente tal que permita que el líquido escurra a la canaleta de recolección de soluciones. La pila se riega por aspersion o goteo. La solución drenada se colecta en un estanque, para luego ser enviada a la etapa de recuperación del metal de interés, obteniéndose una solución agotada, la cual es acondicionada y reutilizada para lixiviar nuevas pilas de mineral. Se aplica a minerales de alta ley debido a los costos de operación y transporte. Los tiempos de lixiviación en este proceso son de algunas semanas en el caso de minerales oxidados y varios meses en el caso de sulfuros.
- e) **Lixiviación por agitación:** La lixiviación en reactores, es solo aplicable a material finamente molido, ya sean lamas, relaves, concentrados o calcinas de tostación, y se realiza utilizando reactores agitados y aireados. Esta operación permite tener un gran manejo y control del proceso de lixiviación. Además, la velocidad de extracción del metal es mucho mayor que lo logrado mediante el proceso de lixiviación en pilas o en bateas. Es un proceso de mayor costo, ya que incluye los costos de la molienda del mineral. En el caso de minerales de cobre se utilizan procesos en pilas o botaderos, es decir grandes cantidades de minerales (que pueden ser aglomerados y/o curados en el caso de las pilas), se amontonan sobre una superficie plana o sobre el costado de una ladera. Sobre

estos apilamientos, es rociada o irrigada una solución ácida. Los microorganismos (en general bacterias autotróficas), se encuentran presentes en forma activa en estos ambientes y las reacciones químicas y biológicas en el interior del apilamiento solubilizan el cobre y otros elementos.

2.3. Características de los minerales de cobre

Las reacciones de lixiviación generalmente involucran la presencia de mezclas de minerales sulfurados y oxidados. El cobre está presente en una amplia gama de mineralizaciones tales como: óxidos, carbonados, silicatos, hidróxidos de cobre y hierro, y otros; los que son lixiviados usando mezclas de ácidos sulfúricos, sulfato férrico y bacterias. A continuación, se detallan antecedentes de las especies mineralógicas más importantes.

2.4. Minerales de cobre

Los minerales de cobre se presentan en la naturaleza en forma de menas sulfuradas, menas oxidadas y en asociaciones con oro, sulfuros metálicos, constituyendo sulfuros complejos. De estos solo nos interesaran los dos primeros grupos.

Los principales óxidos de cobre que se encuentran en los minerales oxidados o mixtos (sulfuros y óxidos) se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.

Óxidos de cobre, presentes en minerales mixtos.

Mineral	Fórmula
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Tenorita	CuO
Cuprita	Cu_2O
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$
Malaquita	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$
Brocantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$

Fuente: Lynn, N. S, 1997

La disolución de estas especies se puede lograr al contactarlas con cantidades suficientes de una solución ácida.

2.5. Ganga en el mineral

Las gangas minerales en general consumen ácido y dentro de las que consumen mayor cantidad se encuentran los carbonatos. En el caso de minerales de cobre los carbonatos más abundantes son: magnesita (MgCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), calcita (CaCO_3), y siderita (FeCO_3), se podría esperar que la disolución acida de estos compuestos aumente la superficie accesible para la lixiviación. Sin embargo, la descomposición de estos carbonatos suele acompañarse de la generación de precipitados como CaSO_4 y MgSO_4 ,

produciendo una barrera difusional. En general la descomposición de carbonatos tiene una cinética mucho que la lixiviación simultánea de los minerales expuestos y por lo tanto la formación de precipitados tendrá un efecto adverso al bloquear el acceso a los sitios de reacción e influir desfavorablemente sobre la permanencia de la pila y la percolación de las soluciones (Lynn, N. S, 1997).

La segunda categoría de ganga consumidora la constituye los minerales de clorita $(\text{Mg, Fe, Al})_6 (\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}\text{H}_8$ y los silicatos. Estos minerales reaccionan mucho más lento que los carbonatos y no pueden ser completamente eliminados en la primera etapa de acidificación del mineral (curado). Luego, junto a carbonatos residuales, persisten en las etapas iniciales de lixiviación.

Otro tipo de ganga la constituye aquellas que contienen potasio, fundamentalmente en la forma de feldespatos de potasio $\text{K Al Si}_3\text{O}_8$ y las arcillas mineralógicas. Este tipo de ganga libera normalmente Al^{3+} , Mg^{2+} y K^+ en presencia de ácido sulfúrico. Adicionalmente se produce la solubilización de la sílice, que se mantiene en forma coloidal.

El potasio se encuentra además en cantidad importante en depósitos porfiricos como biotita $\text{H}_2\text{K}(\text{Mg, Fe})_3\text{Al}(\text{SiO}_4)_3$ y silicatos minerales similares. El potasio de estas estructuras es rápidamente intercambiado por protones y otros

cationes pequeños. Luego son disueltos los otros cationes de la estructura, pero con una cinética mucho menor (salvo la sílice que permanece como residuo) y en proporciones estequiométrica (Lynn, N. S, 1997).

Debe destacarse que la liberación de potasio, en presencia de sulfato férrico, puede producir la precipitación de jarosita potásicas $KFe(SO_4)_2(OH)_6$ (o bien sódicas, si hay sodio) y en presencia de sulfato de aluminio, puede producir también la precipitación de alunitas potásicas $KAl(SO_4)_2(OH)_6$. Esto incide en las características de permeabilidad de la pila y en la disponibilidad de sulfato férrico como agente lixivante.

Las películas de silicatos, óxidos de hierro hidratados y sulfatos de calcio precipitado son capaces de conducir procesos de intercambio iónico con soluciones acuosas, promoviendo la remoción de algunos metales. Ejemplos de estos compuestos son: yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), limonita ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$) y talco ($Mg_3Si_4O_{11} \cdot 2H_2O$).

El comportamiento de la ganga se encuentra íntimamente ligado a las condiciones de acidez en las cuales se desarrolla el proceso. La lixiviación a muy bajo pH puede aumentar la reactividad de la ganga mineral y de este modo acelerar el consumo del ácido. Estas reacciones pueden tener severos efectos en

los equilibrios de solución y equilibrios solución – mineral, acelerando la formación de precipitados.

La composición de la ganga mineral varia en forma importante de una mena a otra, por lo cual una de las formas de caracterizarlas que podemos utilizar es medir la cinética y valor máximo de consumo de ácido que presenta.

El mineral más común que consume ácido es la calcita (carbonato de calcio), que reacciona con el ácido para formar bicarbonato o ácido carbónico. Así mismo estas especies entran en equilibrio para formar dióxido de carbono.

La calcita es generalmente el más reactivo de los minerales consumidores de ácido y como además es uno de los más comunes, se utiliza como referencia para señalar el potencial de consumo de ácido de un mineral. En el cuadro siguiente se expresa el potencial de consumo de ácido de los carbonatos e hidróxidos más abundantes (Lynn, N. S, 1997).

Tabla 2.

Principales minerales consumidores de ácidos y sus características de neutralización.

Minerales	Composición	Potencial de consumo de ácido (%)
Carbonatos		
Calcita / Aragonita	CaCO ₃	100
Dolomita	MgCa(CO ₃) ₂	92
Siderita	FeCO ₃	116
Magnesita	MgCO ₃	84
Rodocrosita	MnCO ₃	115
Witerita	BaCO ₃	196
Ankerita	CaFe(CO ₃) ₂	108
Hidróxidos		
Malaquita	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	74
Gibsita	Al(OH) ₃	26
Limonita / Gestita	FeO	89
Manganita	MnO(OH)	88
Brucita	Mg(OH) ₂	29

Fuente: J. Ipinza, 2005

El potencial de consumo de ácido corresponde el peso en gramos necesarios para lograr el mismo efecto neutralizador que cien gramos de calcita.

2.6. Importancia de la química de soluciones, la termodinámica y la cinética en hidrometalurgia

En general en hidrometalurgia se encuentran reacciones del tipo sólido/liquido salvo en el caso de extracción por solventes donde se trabaja en un

intercambio líquido – líquido. También existen casos en que una fase gaseosa interviene en la reacción, pero en general ello ocurre previa disolución del gas en el líquido. La reacción entonces se produce en la mayoría de los casos en la interface líquido – sólido y solo en algunos pocos casos entre gas y líquido o entre dos líquidos inmiscibles. Se trata en consecuencia de reacciones heterogéneas.

De hecho, la cinética trata de las velocidades en que los procesos, reacciones químicas y fenómenos difusionales que ocurren, en cambio la termodinámica tiene que ver con la posibilidad o imposibilidad de la ocurrencia de un determinado proceso o reacción química, siendo disciplinas complementarias.

Los procesos hidrometalúrgicos suceden a temperaturas bajas o moderadas y en fases acuosas en estas condiciones ocurre lo contrario aun cuando la termodinámica metalúrgica puede ser muy favorable medible a través de la disminución importante de la energía libre de Gibbs ΔG grande y negativo en la mayoría de los casos la limitación estará dada por la cinética. Esto puede ser tanto en cuanto a la velocidad de reacción química propiamente tal como a la rapidez en que ocurren los fenómenos de transporte de masa y difusionales involucrados. En ambos casos el resultado observable y medible es una determinada tasa de transformación en el tiempo. Comparativamente con el caso anterior a bajas

temperaturas normalmente se tratará de procesos mucho más lentos. Así para evaluar un proceso determinado en Hidrometalurgia interesara verificar además que este sea termodinámicamente posible o favorable, cual es la velocidad cinética a la que ocurre este proceso o transformación.

Por su parte la cinética medida a través de una cierta tasa de transformación entregara valiosa información sobre los mecanismos de reacción sea de una reacción propiamente tal, o bien de fenómenos de transporte y difusionales que controlan el proceso. Esto permite influir externamente sobre los mecanismos controlantes y acelerar las transformaciones buscadas. Existen muy pocos antecedentes y base de datos cinéticos propios de la hidrometalurgia por lo tanto en la mayor de los casos debe trabajarse con la información existente procedente de las industrias.

2.7. Elementos de cinética química aplicables en hidrometalurgia.

2.7.1. Importancia del estudio de la cinética.

Tal como se analizó en los procesos propios de la hidrometalurgia resulta importante conocer la velocidad o tasa en que se produce una determinada transformación química o física, sea esta una reacción propiamente tal, o un proceso de más de una etapa en serie, en el que se incluyen fenómenos de

transferencia de masa. Caracterizados por la difusión tanto de reactantes como de productos.

La cinética es la rama de la Fisico-Química que proporciona el soporte conceptual necesario para enfocar la solución de este problema. Sus resultados son determinantes al momento de predecir cuánto tiempo va a demorar una determinada transformación química para así extrapolar estos valores a las condiciones de operación industriales. Así, para casos de una cinética lenta se requieran equipos de mayor tamaño, con las consiguientes mayores inversiones. Por el contrario, en casos de cinética rápida los equipos requeridos serán de menor tamaño y las inversiones disminuirán en concordancia.

Una característica de la transformación química, que tiene una importancia considerable a nivel industrial, es la localización de la reacción. Las reacciones que se producen en el seno de una fase gaseosa, líquida o sólida se denominan homogéneas. En el caso de las reacciones homogéneas en la fase líquida, estas pueden producirse tanto entre compuestos normales líquidos y miscibles, como entre sustancias disueltas.

Por otro lado, las reacciones que se desarrollan en la interfaz de dos medios diferentes, se llaman heterogéneas. Estas son las reacciones de mayor relevancia en hidrometalurgia y comprenden tantas reacciones de un líquido sobre

un sólido (por ejemplo la acción de una solución acida sobre un mineral, o la lixiviación) de un gas sobre un sólido (por ejemplo reacciones de extracción por solventes).

En una reacción heterogénea es importante conocer los mecanismos controlantes de la cinética de cierto proceso más o menos complejo. Es decir, conocer cuáles son los pasos más lentos que pasan a determinar la velocidad de ocurrencia del conjunto del proceso, así se puede accionar directamente sobre ellos y de esta manera ayudar a acelerar el proceso completo.

2.7.2. Energía de activación

La primera consideración que se debe hacer es que las sustancias individualmente consideradas presentan un cierto grado de estabilidad en las condiciones ambientales en que permanecen y además tienden a conservar dicha situación de estabilidad. En caso de no ser ello así, se transformarían a su situación estable y permanecerían en dicha situación de ahí en adelante. Por ejemplo, el Hidrogeno en condiciones que existe como H_2 y no tiende a unirse al oxígeno para formar H_2O . En cambio, si en un proceso electrolítico se forma H atómico, inmediatamente originaria una molécula de H_2 (Ipinza, 2005).

Ahora bien, si observamos que las reacciones se producen por el encuentro o por el choque entre sí de las partículas constituyentes de las sustancias reaccionantes (átomos, moléculas, iones), aquí será donde fundamentalmente influirán las causas que afectan la velocidad de esa reacción. Entonces para que se produzca una reacción, uno de la reacción antes debe encontrarse en un estado de energía superior al valor medio de las demás moléculas de ese reaccionantes de tal forma que pueda vencer las fuerzas que se oponen a la situación de estabilidad antes escrita. Sólo cuando dispongan de esta “energía de activación” serán capaces de producir “encuentros eficaces”, es decir choques tales que la nueva sustancia se produzca efectivamente, sacando a los demás reaccionantes de su situación de estabilidad.

2.7.3. Velocidad de reacción

A continuación, conviene pasar a definir la “velocidad de reacción” que, para una reacción cualquiera, será la variación del número de moléculas de los reaccionantes, es decir, corresponde a una disminución – o bien la variación del número de moléculas del producto de la reacción, es decir si se trata de un aumento en ambos casos en función del tiempo.

$$v = - \frac{dN_r}{dt} = + \frac{dN_p}{dt} \quad [1]$$

$$v = - \frac{dC_r}{dt} = + \frac{dC_p}{dt} \quad [2]$$

En muchos casos, la velocidad de reacción, también puede expresarse como el producto de las concentraciones de los reactivos C_1 y C_2 , y los exponentes: m y n , son denominados “orden de la reacción”. Con respecto a los reactivos 1 y 2 respectivamente.

$$v = k \cdot C_1^m \cdot C_2^n \quad [3]$$

A su vez $(n + m)$ representan el “orden global de la reacción” y puede ser un número entero o fraccionario positivo o negativo. La constante de proporcionalidad (k), es llamada “constante de velocidad de la reacción”. Su valor varía con la temperatura, de acuerdo a la “Ecuación de Arrhenius”.

$$K = A \cdot e^{-E_a/RT} \quad [4]$$

Dicha ecuación también puede expresarse en término logarítmico:

$$\text{Log}_{10} k = -E_a/(2,30 \cdot RT) + \text{constante} \quad [5]$$

O bien en términos diferenciales:

$$d \ln k / dT = E_a / RT^2 \quad [6]$$

Donde:

k = constante de velocidad de reacción

R = constante de los gases (1,987 cal/K* mol)

E_a = Energía de activación (Kcal/ mol)

A = Constante con factor de frecuencia, representa el número de colisiones.

T= Temperatura en grados Kelvin.

2.7.4. Reacciones de primer orden

Como ya se mencionó anteriormente, para los casos en que una reacción o transformación ocurra en una misma fase estaremos hablando de una cinética homogénea. Por ejemplo, este será el caso de dos sustancias disueltas en un líquido (A y B) los “reactantes” que reaccionan produciendo otra sustancia (C), y el “producto de la reacción”, que también estarán disueltas en el mismo líquido.

Si se tiene, por ejemplo: $A + B \rightarrow C$, reacción que ocurre en todo el reactor, en condiciones homogéneas de concentración de cada uno de los dos compuestos, si la reacción no depende de la concentración de las especie B, la velocidad sería:

$$v = -d[A]/dt = k_1[A] \quad [7]$$

2.8. Factores influyentes sobre la cinética

Cuando se desea modificar la velocidad global de ocurrencia de un proceso hidrometalúrgico hay que considerar la posibilidad de modificar alguno de sus factores determinantes entre ellos se destacan los efectos de:

- El tamaño de la partícula en el sólido.
- La concentración del reactante.

- El grado de agitación.
- La temperatura.
- El uso de catalizadores.
- El auto catálisis.

2.8.1. Efecto del estado de división del solido

Las reacciones son intermoleculares por ello los estados gaseosos y líquidos son óptimos para lograr un contacto íntimo entre los reactantes con relación a los sólidos cuando más pequeñas sean las partículas que intervienen en la reacción, más se favorece la velocidad A, resultado obvio esperar que un proceso hidrometalúrgico controlado por la reacción química se verá siempre beneficiado al disminuir la granulometría del sólido.

El efecto al disminuir el tamaño de partícula del solido aumenta en relación cuadrática la superficie disponible para la reacción, es decir una reacción química controlante puede dejar de serlo por este aumento de la superficie útil, a su vez la difusión también se ve favorecida al tener más superficie reactiva disponible dado que se disminuyen los recorridos de los reactantes.

Por otra parte existen también los casos en que ir reaccionando un reactante (A) se disuelve sólo una parte de (C) y otros compuestos quedan como

producto solido de la reacción (D) a este producto solido inerte (D) normalmente poroso se le conoce con el nombre de “ceniza”. De esta forma los reactantes (A) que vienen a continuación deben atravesar difundiendo a través de la zona del nuevo solido producido (ceniza D) hasta alcanzar la interfase de la reacción (en B), esta va avanzando hacia el interfase de la reacción (en B) en la forma adecuada.

2.8.2. Efecto de la concentración de reactantes.

La concentración de reactantes determina directamente el gradiente de difusión y se puede comprobar en los casos en que la difusión de los productos de la reacción sean los controlantes del proceso.

Por su parte la velocidad de la reacción química según se vio en todos los casos directamente proporcional a la concentración, elevado a la potencia correspondiente al orden de la reacción. Para graficar lo dicho a través de un ejemplo, se usará el caso de la disolución de óxidos de cobre en H_2SO_4 diluido, experimentalmente se observa que a bajas concentraciones de ácido el control es difusión, luego al aumentar el ácido disponible se pasa a un control químico.

2.8.3. Efecto del grado de agitación

Para ciertas reacciones al aumentar la agitación aumenta también la velocidad (la reacción). Esto corresponde al caso en que la difusión controla el mecanismo global del proceso, lo que implica que la velocidad global V , aumentara directamente proporcional con la velocidad de agitación (rpm), ya que ésta hace disminuir el espesor de la capa límite, mejorando la difusión de los reactantes y/o productos.

En el caso en que la velocidad global de reacción del proceso está controlada por la velocidad de la reacción química entonces la velocidad del proceso es independiente de la agitación. Por ejemplo, esta situación se observa en la disolución de cobre metálico (Cu^0) con una solución amoniacal en presencia de O_2 cuyos resultados experimentales se observó que la velocidad de disolución obtenidos a presión de oxígeno de 1,4 atmosferas resultan crecientes con la agitación, es decir en ese rango de condiciones operativas el proceso está controlado por la difusión. Sin embargo, a una presión de oxígeno mayor el proceso está controlado por la reacción química, ya que la velocidad de disolución es independiente de la agitación aplicada. En este caso se observa que la agitación influye o no en la cinética según cuál sea el mecanismo controlante del proceso. Algo similar ocurre al aumentar la presión parcial de oxígeno.

2.8.3. Efecto de la temperatura

La aplicación de calor es el procedimiento más efectivo, en la mayoría de los casos, de suministrar la energía de activación a las moléculas reaccionantes y por tanto de aumentar la velocidad de una reacción. Cualitativamente se puede señalar en forma aproximada que la velocidad de reacción química duplica con cada incremento de 283 K, en un sistema; en muchos casos este incremento puede llegar a ser aún mayor. En efecto, si las reacciones son endotérmicas, el suministro de calor se utiliza en hacer adquirir la energía de activación a las moléculas reaccionantes y así promover la ocurrencia del proceso. A su vez si las reacciones son exotérmicas se producen dos efectos. En primer lugar, se entrega calor para proporcionar la energía de activación sin cual el proceso no se desarrolla o bien lo hace lentamente y luego cuando la reacción desprende calor, este puede ser absorbido por el ambiente o bien provocar un nuevo aumento de la velocidad, en cuyo caso el proceso continúa acelerándose, terminando en una combustión o una explosión.

2.9. Modelo cinético del núcleo sin reaccionar

El comportamiento parabólico de la lixiviación está relacionado con las etapas involucradas en el mecanismo de lixiviación de una partícula de mineral.

Las etapas son:

- 1) Reactivo lixivante (H^+ , Fe^{+3}) difunde a través de capa límite hacia superficie.

- 2) Reactivo lixiviante difunde en el interior de la partícula hacia la zona de reacción.
- 3) Ocurre la reacción química, se forman productos de la reacción.
- 4) Productos solubles de la reacción (Cu^{+2} , Fe^{+2}) difunden en el interior de la partícula hacia la superficie de ésta.
- 5) Productos solubles difunden a través de la capa límite hacia el seno de la solución.

Estas etapas se esquematizan en la figura 1 para el caso de las dos reacciones vistas.

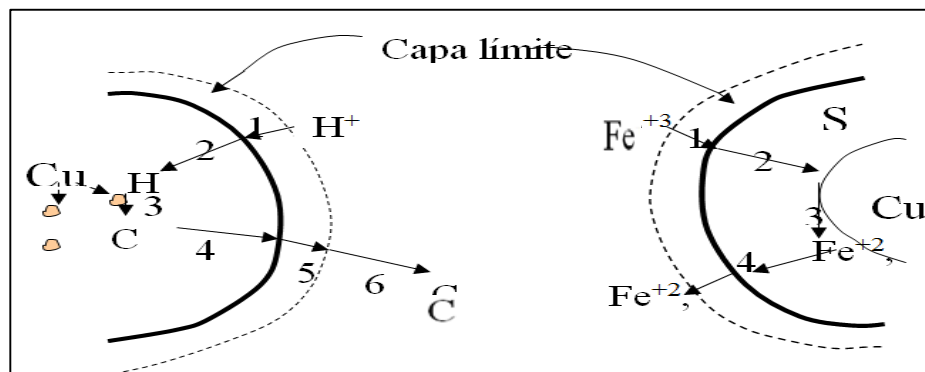


Figura 1. Mecanismo de lixiviación de una partícula de mineral

Fuente: J. Izquierdo, 2004

La velocidad de lixiviación es inicialmente alta ya que el reactivo ataca directamente a las especies de cobre presentes en la superficie de la partícula. Con el tiempo la velocidad de lixiviación decae porque la superficie de reacción está

cada vez más alejada de la superficie de la partícula y entonces los reactivos y productos toman más tiempo en desplazarse al interior de la partícula.

Se puede demostrar matemáticamente que este mecanismo de reacción es el origen del comportamiento parabólico observado en lixiviación. Esto se esquematiza en la siguiente figura 2.

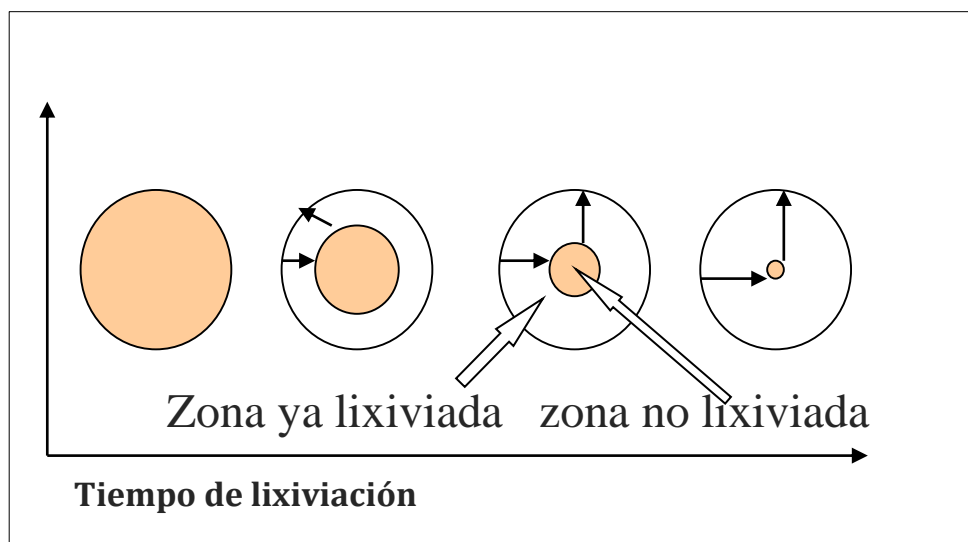


Figura 2. Velocidad de lixiviación en la superficie de reacción

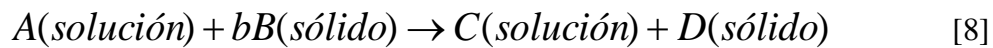
Fuente: J. Izquierdo, 2004

Se muestra a continuación la deducción de la ecuación de la velocidad de lixiviación de una partícula de mineral para dos casos extremos:

- a) El caso en que la velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de difusión del reactivo lixivante a través del sólido (etapa 2)

- b) El caso en que la velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de reacción entre el reactivo lixivante y la especie mineral (etapa 3).

La nomenclatura a usar se basa en considerar la cinética de la siguiente reacción de lixiviación general:



Que corresponde al caso de la lixiviación de una especie mineral B con un reactivo de lixiviación A, produciendo un producto soluble C y un producto sólido D. En el caso de la lixiviación ácida de tenorita, H^+ corresponde a A, CuO a B, y Cu^{+2} al producto soluble de la reacción. En el caso de la lixiviación de covelina con ión férrico, Fe^{+3} corresponde a A, CuS a B, Cu^{+2} y Fe^{+2} a C, S^0 al producto sólido D.

- a) Caso control difusional

La Figura representa la configuración y el perfil de concentración de reactivo en un cierto momento de la lixiviación de una partícula de radio R.

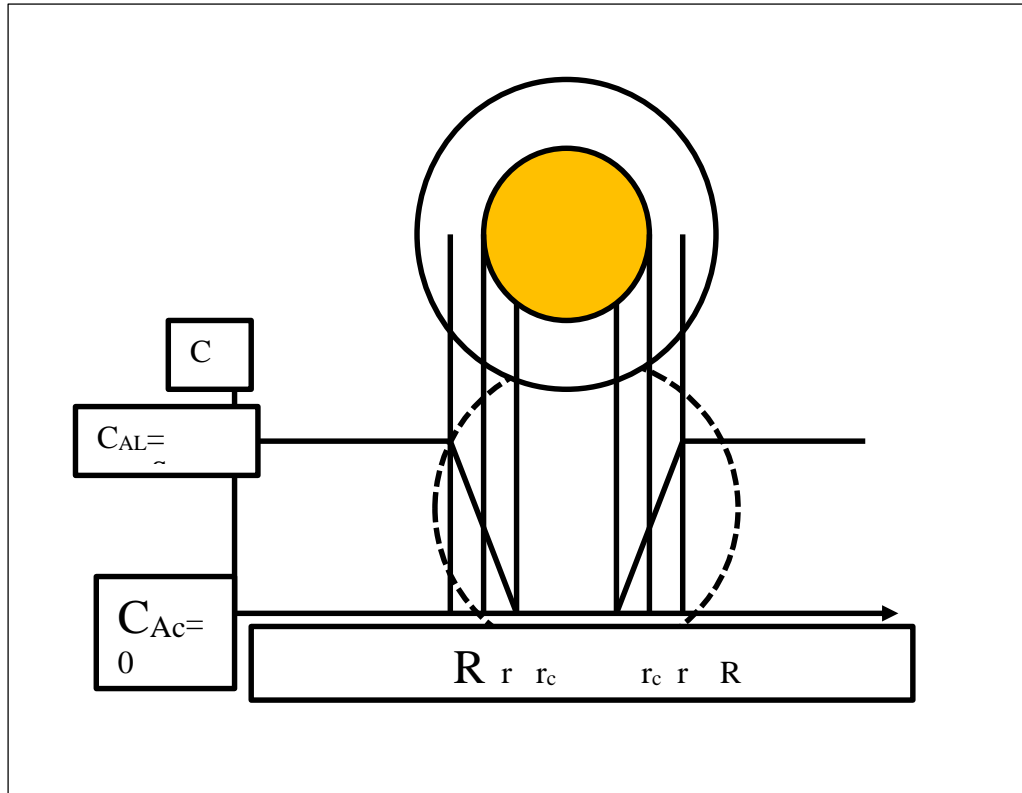


Figura 3. Control difusional a través de la capa de ceniza. La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactante en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.

Fuente: J. Izquierdo, 2004.

Para deducir una expresión entre el radio del núcleo sin reaccionar y el tiempo de lixiviación, se efectúa un análisis en dos etapas: a) primero, se considera una partícula que ha reaccionado parcialmente (ver Figura 3), escribiendo las ecuaciones para el flujo de reactivo; b) segundo, se aplica la relación encontrada en (a) para todos los valores de r_c , es decir, se integra entre R , valor inicial de r_c y 0, valor final de r_c .

Etapas

La velocidad de reacción (de consumo) del agente lixivante está dada por su velocidad molar de difusión. En la superficie genérica de radio r ésta es:

$$-\frac{dN_A}{dt} = 4\pi r^2 Q_A \quad [11]$$

En que Q_A es la densidad de flujo de A (moles A/t x área) en el sólido a través de la superficie de la esfera de radio r , y que está dada por la Ley de Fick:

$$Q_A = D_{eff} \left. \frac{dC_A}{dr} \right|_{r=r} \quad [12]$$

Donde:

D_{eff} : Es el coeficiente de difusividad efectiva del reactivo lixivante A, a través de la capa de sólido reaccionado.

Combinando ecuaciones 11 y 12 se tiene:

$$-\frac{dN_A}{dt} = 4\pi r^2 D_{eff} \frac{dC_A}{dr} \quad [13]$$

Pero como el radio del núcleo sin reaccionar varía muy lentamente en relación a la velocidad de desplazamiento de A hacia la zona de reacción, se alcanza un estado pseudo-estacionario en el cual el flujo de A, $-dN_A/dt$, es

constante. Luego se puede integrar a lo ancho de la zona no reaccionada, desde R a r_c :

$$-\frac{dN_A}{dt} \int_R^{r_c} \frac{dr}{r^2} = 4\pi D_{eff} \int_{C_{As}}^{C_{Ac}} dC_A \quad [14]$$

Se obtiene:

$$-\frac{dN_A}{dt} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right) = 4\pi D_{eff} C_{As} \quad [15]$$

De donde se tiene:

$$-\frac{dN_A}{dt} = \frac{4\pi D_{eff} C_{As}}{\left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right)} \quad [16]$$

Esta expresión muestra que efectivamente la velocidad de reacción disminuye en la medida que r_c disminuye, o sea, disminuye en la medida que se avanza en el proceso de lixiviación de la partícula, lo que es consistente con el proceso parabólico descrito al principio.

Etapa b

En la segunda etapa del análisis se considera la variación del tamaño del núcleo sin reaccionar en el tiempo. Para un determinado tamaño r_c del núcleo vimos $-dN_A/dt$ se puede considerar constante. Sin embargo, a medida que el núcleo disminuye su tamaño la capa de sólido a través de la cual debe difundir A para llegar a reaccionar será mayor, lo que ocasiona una disminución de la velocidad de difusión de A, o sea de $-dN_A/dt$.

Para resolver en el tiempo es necesario relacionar primero la velocidad de consumo de A con la variación del radio r_c . Si la partícula de mineral o concentrado tiene un volumen V (dm^3) y la densidad molar de B (la especie mineral que se lixivía) en esa partícula es ρ_B (moles B/ dm^3), entonces el número total de moles en la partícula es:

$$N_B = \rho_B V \quad [17]$$

Cuando se consumen dN_A moles de A se cumple que

$$-bdN_A = -dN_B = -\rho_B dV = -\rho_B d\left(\frac{4}{3}\pi r_c^3\right) = -4\pi\rho_B r_c^2 dr_c \quad [18]$$

O sea la variación del tamaño del núcleo asociada al consumo de reactivo dN_A está dada por:

$$-bdN_A = -4\pi\rho_B r_c^2 dr_c \quad [19]$$

Reemplazando dN_A en la expresión de $-dN_A/dt$, ecuación 24, se tiene:

$$-\rho_B \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right) r_c^2 dr_c = bD_{eff} C_{As} dt \quad \text{Integrando:} \quad [20]$$

$$-\rho_B \int_{r_c=R}^{r_c} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right) r_c^2 dr_c = bD_{eff} C_{As} \int_0^t dt \quad [21]$$

Lo que da finalmente:

$$t = \frac{\rho_B R^2}{6bD_{eff} C_{As}} \left[1 - 3 \left(\frac{r_c}{R} \right)^2 + 2 \left(\frac{r_c}{R} \right)^3 \right] \quad [22]$$

La razón r_c/R se puede relacionar con el grado de conversión X_B , o sea la fracción de B que ha sido lixiviada, mediante la expresión:

$$1 - X_B = \frac{\frac{4}{3} \pi r_c^3 (\text{vol. núcleo. sin reaccionar})}{\frac{4}{3} \pi R^3 (\text{vol. partícula total})} = \left(\frac{r_c}{R} \right)^3 \quad [23]$$

Luego, reemplazando en ecuación 13:

$$t = \frac{\rho_B R^2}{6bD_{eff} C_{As}} \left[1 - 3(1 - X_B)^2 + 2(1 - X_B)^3 \right] \quad [24]$$

Si τ es el tiempo necesario para lixiviar todo el B presente, o sea para que $X_B = 1$, de la expresión anterior se obtiene que:

$$\tau = \frac{\rho_B R^2}{6bD_{eff} C_{As}} \quad [25]$$

Luego se puede describir la ecuación 15 como:

$$\frac{t}{\tau} = [1 - 3(1 - X_B)^2 + 2(1 - X_B)^3] \quad [26]$$

b) Caso control químico

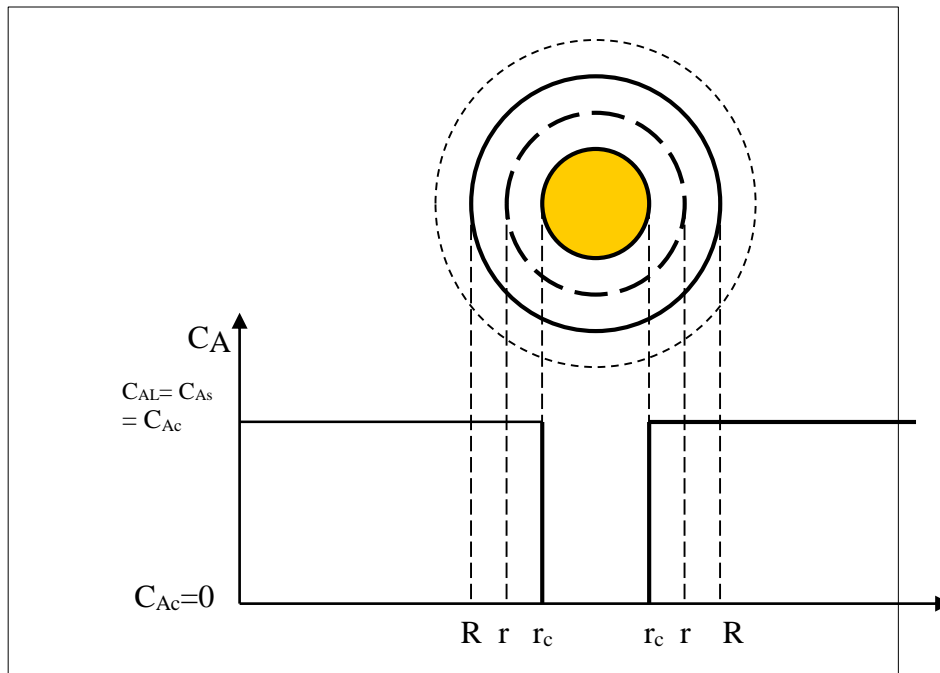


Figura 4. Control químico. La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactante en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.

Fuente: J. Izquierdo, 2004.

En este caso la velocidad de reacción es proporcional al tamaño de la superficie del núcleo no reaccionado:

$$-\frac{dN_B}{dt} = -\frac{bdN_A}{dt} = bK_s C_{AL} (4\pi r_c^2) \quad [27]$$

Donde K_s es la constante cinética de la reacción en la superficie del núcleo. Expresando N_B nuevamente en base a la ecuación 18:

$$-bdN_A = -dN_B = -\rho_B dV = -\rho_B d\left(\frac{4}{3}\pi r_c^3\right) = -4\pi\rho_B r_c^2 dr_c \quad [28]$$

Se tiene:

$$-\frac{1}{4\pi r_c^2} \rho_B 4\pi r_c^2 \frac{dr_c}{dt} = -\rho_B \frac{dr_c}{dt} = bK_s C_{AL} \quad [29]$$

Integrando:

$$-\rho_B \int_R^{r_c} dr_c = bK_s C_{AL} \int_0^t dt \quad [30]$$

O bien:

$$t = \frac{\rho_B}{bK_s C_{AL}} (R - r_c) \quad [31]$$

El tiempo τ para lixiviar toda la partícula ($r_c=0$), es:

$$\tau = \frac{\rho_B R}{bK_s C_{AL}} \quad [32]$$

Incorporando la expresión de τ en la ecuación 30 y reordenando se

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r_c}{R} \quad \text{tiene:} \quad [33]$$

Finalmente, reemplazando r_c/R de ecuación 23, se llega a:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - (1 - X_B)^{1/3} \quad [34]$$

Donde:

τ : tiempo de conversión total del sólido, días.

x : conversión, disolución de cobre.

R : radio inicial de partícula, cm.

ρ_B : densidad de partícula, mg/cm^3 .

b : coeficiente estequiométrico de la fase sólida.

C_{Ag} : concentración del reactivo en la fase líquida, mg/l

D_e : coeficiente de difusión efectivo.

k_s : coeficiente cinético de reacción, $\text{l}/\text{cm}^2 \cdot \text{días}$.

τ_1 : τ de difusión en la ceniza, días.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Las pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Metalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna, durante el año 2015 y el último trimestre del 2016. El mineral oxidado de cobre procede del denuncia minero Meltral 1, Zona de Sama Inclán - Tacna.

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Para este trabajo de investigación, para la demostración de sus objetivos planteados se ha realizado pruebas experimentales de lixiviación en columnas, así demostrar que el uso de este proceso a nivel de laboratorio, es confiable para el escalamiento a nivel piloto o industrial.

3.2. Muestra

La muestra de mineral oxidado de cobre extraído del denuncia minero Meltral 1, Sama Inclán - Tacna; básicamente está compuesta de crisocola y malaquita, en menor proporción azurita, tenorita y una variedad ganga que baja la

recuperación e incrementa el consumo de reactivos. La muestra de mineral que se trasladó de mina a laboratorio de metalurgia fue alrededor de 120 kilos.



Figura 5. Mineral oxidado de cobre
Fuente: Elaboración Propia

3.3. Equipos, materiales y reactivos

Equipos, materiales y reactivos de laboratorio para el desarrollo de la investigación:

1) Equipos

- Molino de bolas
- Horno de mufla
- Ro-Tap
- Balanza analítica

- pHmetro
- Agitador, con velocidad de agitación controlada, con sus accesorios recipiente
- Chancadora de quijadas
- Molino de bolas capacidad para 2 kg de muestra
- Columnas de lixiviación
- Juego de tamices para medir la granulometría o tamaño de partícula
- Mortero para molienda fina para muestras menores de 500 gramos
- Balanza analítica
- Equipo de absorción atómica (laboratorio de química)
- Filtrador al vacío

2) **Materiales y reactivos**

- Ácido sulfúrico
- Carbonato de sodio
- Indicador naranja de metilo
- Ioduro de potasio
- Ácido nítrico
- Ácido clorhídrico
- Clorato de potasio
- Tiosulfato de sodio

- Ioduro de potasio
- Papel filtro
- Plásticos impermeable
- Envases de 12 litros con regulador de flujo de salida
- Probeta de 10 ml, 50 ml y 1000 ml
- Varios envases para la recepción de la solución
- Bandeja de acero
- Vasos, pizetas, buretas, matraz
- Recipiente para el agua
- Vasos de precipitación de 50,100, 200, 500 ml
- Probetas para medir líquidos
- Fiolas aforadas
- Vasos erlenmeyer

3.4. Operacionalización de variables

Todas las pruebas experimentales se han realizado en el Laboratorio de la Escuela de Metalurgia - UNJBG, considerando las siguientes variables del proceso:

- Concentración de ácido sulfúrico en gramos por litro (g/l).
- Tiempo de operación en minutos.
- Granulometría del mineral (tamaño de partícula) en micras.

- Recuperación de cobre en la solución de sulfato de cobre.

3.5. Métodos y procedimientos

Las pruebas experimentales se inician con la evaluación de consumos de ácido, realizadas en pruebas de lixiviación en botellas, posteriormente se hacen las pruebas de lixiviación en columnas variando la granulometría del mineral.

3.6. Procedimiento experimental de lixiviación

La ejecución del presente trabajo de tesis se efectúa de la siguiente forma:

- Inicialmente se determinó el consumo de ácido en botella y el cobre soluble estimado.
- Posteriormente se hicieron las pruebas de lixiviación en columnas, considerando diferentes tamaños de granulometría, con el fin de relacionar la granulometría con respecto a la recuperación del cobre a partir de minerales oxidados de cobre.

3.6.1. Lixiviación en botella

Consiste en colocar el mineral con agua y/o ácido sulfúrico en botellas, para dejarlas rotar sobre rodillos giratorios a una velocidad determinada, posteriormente se deja reposar un tiempo necesario para que el mineral decante, se sacan muestras y se obtiene resultados de mediciones de pH y temperaturas. El

grado de molienda debe ser lo suficiente para exponer la superficie del mineral valioso a la acción de la solución lixivante. Dependiendo del mineral y sus características mineralógicas. Deberá considerarse un tamaño tal que no contenga un exceso de gruesos (>2 mm) que produzca problemas en la agitación y que no contenga un exceso de finos (menos de $40\% < 75$ micrones), que dificulten la separación sólido-líquido posterior de la pulpa lixiviada. Debido a lo anterior, y para disminuir los consumos de energía por concepto de molienda y los costos de filtración y decantación, la agitación en las botellas deberá ser realizarla al mayor tamaño que la operación lo permita.

La velocidad de los rodillos debe ser la suficiente para mantener los sólidos en suspensión, para que no decanten. Una velocidad alta tiende a favorecer la cinética de la reacción, pero tiene un costo energético apreciable. Favorece también la disolución de gases en la solución.

Finalmente, cuando el tiempo de rotación termine, se detienen los rodillos, y se aguarda un tiempo para que el mineral decante. Al suceder esto, es posible ver con claridad las dos fases.

a) Operación de la botella

Para la realización de las pruebas de lixiviación por agitación sobre rodillo se siguen los siguientes pasos. Este procedimiento es similar para cada una de las 5 muestras en los distintos tiempos destinados para su lixiviación o bien en la toma de muestras en la misma botella, como es en presente trabajo de tesis.

- 1) El ensayo se realizó en una botella de vidrio de 5 litros.
- 2) Se agrega 200 g de mineral a la botella (el mineral de cabeza fue pasado por malla -10 al 100 %).
- 3) Se agrega a la misma botella 300 ml de ácido (preparado por el laboratorio químico, agua destilada + 50 g/l H₂SO₄) y se tapa la botella.

$$50 \text{ gr} \rightarrow 1000 \text{ ml}$$

$$x \rightarrow 300 \text{ ml}$$

$$V = \frac{15 \text{ gr}}{1,84} = 8,15$$

$$V = 8 \text{ ml de H}_2\text{SO}_4 \text{ para cada botella}$$

- 4) La botella con la solución de H₂SO₄ y el mineral se agita por 5 segundos, siendo está destapada con el propósito de evacuar los gases que salen de esta, debido a las reacciones que en ella ocurren. Después de esto, se vuelve a tapar.

- 5) La botella está puesta sobre los rodillos giratorios, que a su vez la hacen girar (45 rpm) y por ende empieza una lixiviación por agitación.
- 6) Se desconecta el sistema giratorio y tomando la botella se destapa para la evacuación de gases (este procedimiento se lleva a efecto cada 15 min. por un lapso de tiempo de dos horas).
- 7) El en proceso se toma 7 muestras; durante 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h y 48 h respectivamente.
- 8) Una vez que se toma la última muestra en contacto con el ácido (en la botella) ha cumplido con el tiempo destinado para la experiencia, es sacada del sistema.
- 9) Toda la solución lixiviada en la botella es filtrada.
- 10) La solución filtrada (aprox. 100 ml) se deposita en un recipiente de plástico (capacidad 250 ml) y se lleva a análisis químico.
- 11) A la pulpa restante se realiza un lavado (se repite 3 veces el lavado).
- 12) Los ripios (pulpa restante) es llevada a secado.
- 13) Luego, se saca una muestra de aproximada de 120 g.

3.6.2. Lixiviación en columnas

Los pasos tradicionales para evaluar una lixiviación en pilas implican análisis mineralógico, químico y otras determinaciones básicas, que son seguidas

por pruebas en columnas bajo variadas condiciones de lixiviación para descubrir aquéllas que brindarán mejores resultados.

a) Preparación de la columna para aglomerar y curar.

- Tomar medidas de columna.
- Determinar volumen de columna.
- Determinar capacidad de columna.
- Calcular ácido para aglomerar.
- Aglomeración y curado del mineral (dar reposo).
- Cargar columna con mineral.

b) Preparación de una solución lixivante

- Calcular volumen de ácido para 5 g/l.
- Ingresar volumen de H_2SO_4 .
- Luego enrasar a 20 litro.
- Agitar lentamente por unos minutos.
- Tomar muestra para determinar ley de ácido.

c) Calibrar tasa de riego.

- Calibrar tasa de riego en 5,7 ml/min.
- Disponer recipiente con sonda para agregado de riego.

- Abrir flujo en sonda y contar gotas en tiempo cronológico.
- Medir flujo en pipetas para determinar tasa de riego.

Para continuar con nuestra experiencia se calibra flujo de riego a 2 ml/min. (tasa de riego), utilizando una sonda se comienza a adicionar solución lixivante en un recipiente, tomando en cuenta el tiempo cronológico y el número de gotas que se ingresan a este, para luego medir el flujo alimentado con pipeta graduada. Una vez definida la tasa de riego se debe comenzar a adicionar la solución lixivante a la columna con el mineral aglomerado dando inicio al riego de la experiencia.

Se debe chequear periódicamente que el sistema de riego sea constante, además de tomar muestras de solución rica obtenida a diario para calcular las leyes de Cu y H⁺ de cada muestra una vez concluida la experiencia.

d) Operación de la columna.

- 1) Acondicionar la columna con todos sus componentes como:
 - Columna de carga de mineral 0,1016 m (4") de diámetro.
 - Embudo de filtrado para la parte inferior de la columna.
 - Circulo de manguera de 0,003175 m (1/8") perforado para regadera.
 - Manguera de alimentación de solución de riego (vía para suero).

- Dos baldes de 5 litros para solución de riego y cosecha (PLS)
- 2) Determinar la densidad aparente en un recipiente de volumen conocido.
 - 3) Verificar el peso de mineral a cargarse en la siguiente forma: Triturar el mineral a 100 % - 0,0125 m ($\frac{1}{2}$ ")- 0,01905 m ($\frac{3}{4}$ ") y – 0,0254 m (1").
 - 4) Determinar el ácido necesario para el peso de mineral a cargarse.
 - 5) Realizar e curado del mineral con el 70 % del ácido total y guardar el 30 % restante para el riego.
 - 6) Considerar para el curado un volumen de solución equivalente al 10 % del peso del mineral (aproximadamente 1 litro).
 - 7) Agregar el ácido del curado en 700 ml de agua y enrasar a 1 litro. Tener cuidado con el incremento de temperatura de la mezcla por el calor de disolución que se genera.
 - 8) La concentración de la solución de curado será:
 - Peso del ácido de curado en g/l.
 - La concentración estará en el rango de 250 a 350 g H_2SO_4 / litro de solución.
 - 9) El un balde de plástico de aproximadamente 12 litros agregar el mineral, luego agregar el litro de solución de curado y mezclar a humedad uniforme.
 - 10) Dejar reposar por 24 horas y luego cargar el mineral curado en la columna.

- 11) Preparar la solución de riego: agua y agregar el ácido de riego correspondiente y enrasar a 20 litros. La concentración de riego estará entre 5 -10 g H_2SO_4 / litro de solución.
- 12) El riego a un flujo de 5,7 l/min, la solución se prepara en un balde de 20 litros de capacidad para 48 horas.
- 13) El tiempo de lixiviación será de 30 días.



Figura 6. Mineral oxidado de cobre aglomerado.

Fuente: Elaboración Propia



Figura 7. Columna de lixiviación

Fuente: Elaboración propia

3.7. Determinación de cobre en solución

Se toma una muestra de solución rica con una pipeta graduada para 2 ml, se agrega a un vaso precipitado, luego se añade 5 ml de agua desmineralizada agitando constantemente la solución se comienza agregar los reactivos comenzando con el permanganato de potasio obteniendo una coloración (morado o violeta), posteriormente se adiciona unas gotas de sulfato ferroso hasta la descoloración total, a continuación y sin dejar de agitar se agrega una punta de espátula de acetato de sodio tomando un color verde, se ingresa a la solución unas gotas de ácido acético al 5 % y una punta de espátula de fluoruro de sodio alcanzando una tonalidad de color celeste, se adiciona 1 gramo de yoduro de

potasio, llegando a un color café oscuro.

Se prepara una bureta con tiosulfato de sodio y se comienza a titular hasta que toma una coloración blanco pajizo, se mide y registra el gasto para el cálculo de la ley de Cu.

3.8. Determinación de ácido en solución

Se toma una muestra de solución rica con una pipeta graduada para 2 ml, se agrega a un vaso precipitado, luego se añade 100 ml de agua desmineralizada agitando constantemente la solución se comienza agregar 3 gotas de anaranjado de metilo.

Se prepara una bureta con hidróxido de sodio (0,1N) y se comienza a titular hasta que toma una coloración naranja, se mide y registra el gasto para el cálculo de la concentración de ácido en la solución.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Caracterización mineralógica del mineral oxidado de cobre

La veta cobre cuya mineralización consiste exclusivamente en crisocola y malaquita, se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.

Mineralógica de los óxidos de cobre

Concentrado	Fórmulas
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
Sílice	SiO_2
Hematita	Fe_2O_3
Magnetita	Fe_3O_4
Bauxita	Al_2O_3
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Caolinita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Fuente: Reconocimiento de roca por el geólogo de FAIN



Figura 8. Mineral oxidado de cobre del yacimiento Meltral 1, Sama Inclán.
Fuente: Fotografía tomada por el autor

4.2. Análisis químico del mineral oxidado de cobre

La lectura para cada metal se realizó por análisis químico gravimétrico y volumétrico. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.

Análisis químico del mineral oxidado de cobre (en %)

Unidad	Cu T	Cu _{ox}	Cu _{ins}	Fe total	CO ₃
%	4,8	4,5	0,46	5,74	1,84

Fuente: Elaboración propia

4.3. Análisis físico del mineral oxidado de cobre

Para el análisis granulométrico del mineral se hizo el trabajo considerando la Malla 1", ½", ¾" (ver tabla 6, 7 y 8), mediante un Ro-Tap (TYLER). El peso específico y la densidad aparente se determinaron por el método de la probeta, el control de pH con pHmetro digital (WATERPROOF), los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Análisis físico del mineral oxidado de cobre

Parámetros	Valores
Granulometría	100% m 1", ¾" y ½"
Peso específico (g/ml)	2,3
Densidad aparente	1,8; 1,54; 1,38
pH	6,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.

Análisis granulométrico 100 % -m 1" mineral oxidado de cobre

Malla ASTM	Apertura	Peso (g)	% Peso	% Acumulado	% Pasante
1"	25400	0,389	39,10	39,10	60,905
1/2"	12700	0,317	31,86	70,95	29,045
1/4"	6350	0,175	17,60	88,55	11,447
m 4	4757	0,031	3,12	91,67	8,332
m 8	2378	0,036	3,60	95,27	4,734
m 14	1414	0,016	1,62	96,88	3,116
m 20	841	0,007	0,71	97,60	2,402
m 35	500	0,002	0,21	97,81	2,191
m 50	297	0,001	0,11	97,92	2,080
m 70	210	0,001	0,10	98,02	1,980
m 100	149	0,001	0,98	98,10	1,899
-m 100		0,019	1,90	100,00	0,000
		0,995	10000		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.

Análisis granulométrico 100 % -m 3/4" mineral oxidado de cobre

Malla ASTM	Apertura	Peso (g)	% Pasante	% Acumulado	% Pasante
1"	25400	0	0,00	0,00	100,000
1/2"	12700	0,467	46,88	46,88	53,116
1/4"	6350	0,251	25,25	72,13	27,869
m 4	4757	0,088	8,79	80,92	19,075
m 8	2378	0,088	8,86	89,79	10,211
m 14	1414	0,035	3,49	93,28	6,724
m 20	841	0,016	1,56	94,83	5,166
m 35	500	0,006	0,60	95,44	4,563
m 50	297	0,004	0,38	95,82	4,181
m 70	210	0,003	0,34	96,16	3,839
m 100	149	0,003	0,28	96,44	3,558
-m 100		0,035	3,53	99,97	0,030
		0,995	99,97		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8.

Análisis granulométrico 100 % -m 1/2" mineral oxidado de cobre

Malla ASTM	Apertura	Peso (g)	% Pasante	% Acumulado	% Pasante
1"	25400	0	0,00	0,00	100,000
1/2"	12700	0	0,00	0,00	100,000
1/4"	6350	0,597	60,00	60,00	40,000
m 4	4757	0,134	13,49	73,49	26,513
m 8	2378	0,127	12,76	86,25	13,749
m 14	1414	0,050	5,03	91,28	8,724
m 20	841	0,020	2,05	93,33	6,673
m 35	500	0,006	0,60	93,93	6,070
m 50	297	0,004	0,40	94,33	5,668
m 70	210	0,003	0,25	94,58	5,417
m 100	149	0,002	0,19	94,78	5,224
-m 100		0,052	5,23	100,00	-0,002
		0,995	100,00		

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 09, 10 y 11, se presenta la variación en la distribución granulométrica y en la cantidad de finos bajo la malla 100, resultando los siguientes valores: 1,89 % de finos para minerales de 100 % pasante malla 1", 3,55 % para minerales de 100 % pasante malla 3/4" y 5,22 % para minerales de 100 % pasante malla 1/2".

Estos valores indicados muestran que a menor granulometría del mineral se tendrán mayor cantidad de finos que pueden perjudicar el proceso de lixiviación y pueden incrementar la cantidad de aglomerante, donde ocurre la adhesión de las

partículas finas a las gruesas, las que actúan como núcleos, a partir de la distribución de tamaños en la alimentación.

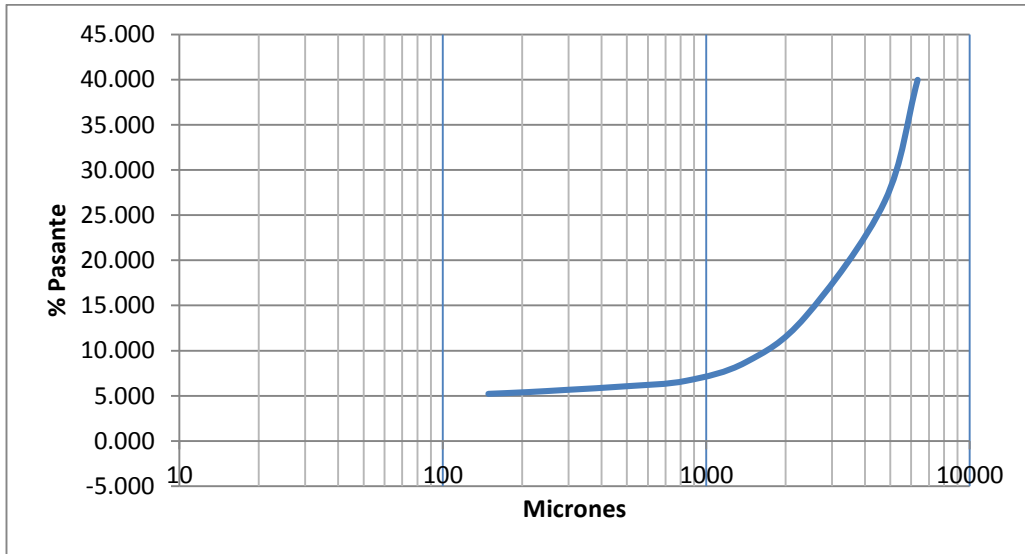


Figura 9. Curva de análisis granulométrico 100 % -m 1/2"
Fuente: Elaboración propia.

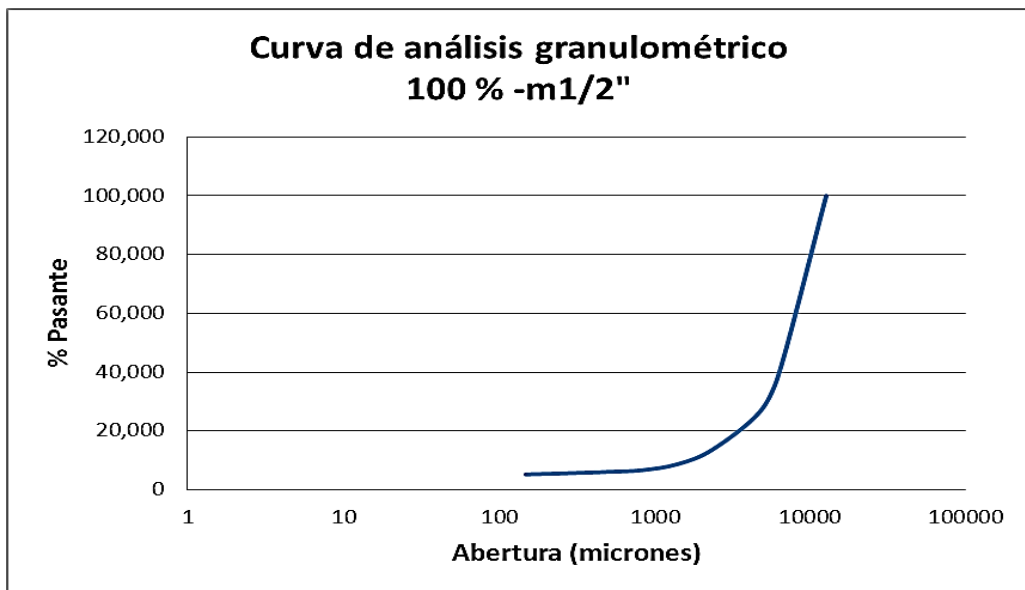


Figura 10. Curva de análisis granulométrico 100 % -m 3/4"
Fuente: Elaboración propia.

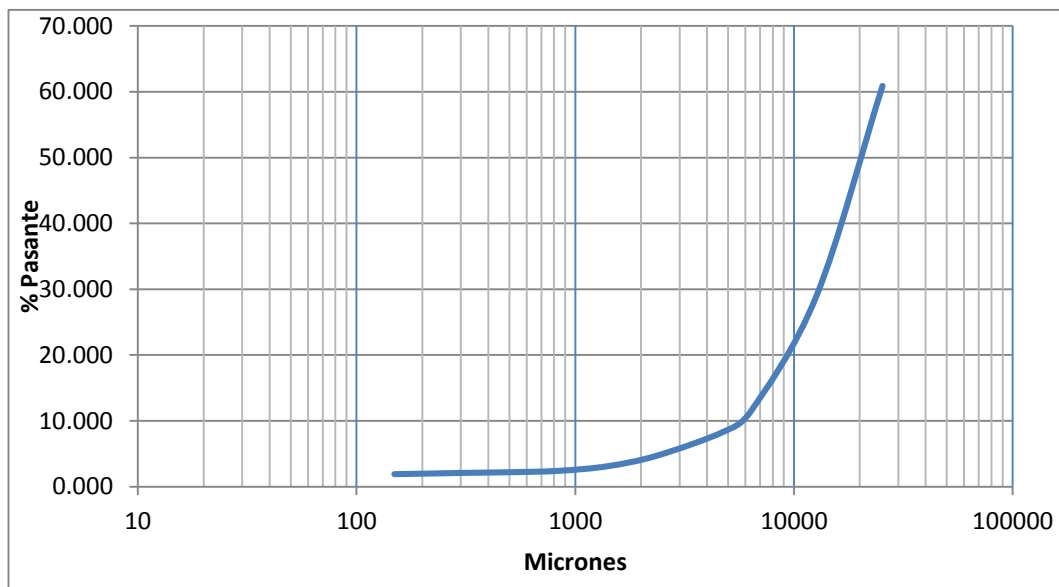


Figura 11. Curva de análisis granulométrico 100 % -m 1"

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Lixiviación en botella

Las pruebas de lixiviación en botellas se realizaron con dos fines primero para determinar el consumo del agente lixivante es decir la cantidad de ácido a usar en las pruebas en columna, asimismo para ver el cobre soluble. El consumo de ácido es 99,79 kg de ácido sulfúrico por tonelada de mineral, ver tabla 9, de resultados.

En la tabla 10, se realizó considerando parámetros fijos y a la vez considerando el tiempo desde las 2 horas hasta las 48 horas, tomando muestra cada 2 h, 4 h, 6 h, 8 h, 12 h, 24 h, 48 h, se observa en la tabla 10, así mismo se muestra para los tiempos mencionados, con el fin de determinar la ley de cobre en g/l, para finalmente determinar la extracción del cobre.

Tabla 9.

Parámetros de las pruebas de lixiviación en botellas

Características	Cantidad
Fecha de inicio de las pruebas	27/9/16
Hora de inicio de las pruebas	11:00 horas
Peso seco de la muestra (Kg)	0,20
Peso del agua (l)	0,30
Peso botella vacía (Kg)	1,87
Peso botella con pulpa (Kg)	2,37
Granulometría de la muestra	80 % M -10
Velocidad de agitación (rpm)	45
Consumo de H ₂ SO ₄ (Kg/t)	99,79
Fuerza de H ₂ SO ₄ de trabajo (g/l)	67
Cabeza Ensayada de Cu (%)	4,8
Cabeza Calculada de Cu (%)	43,66
Ripios de Cu (%)	0,52
Extracción Cu (%)	89,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10.

Resultados de las pruebas

TIEMPO AGITACIÓN (h)	ALICUOTA (ml)	Gasto NaOH (ml)	PARÁMETROS		LEY COBRE PLS (g/l)	CONTENIDO FINOS (g)	EXTRACCION (%)	ADICIÓN H ₂ SO ₄	
			Gasto NaOH (ml)	PH Inicial				Cu	Cu
0	0	0,0	0	6,70	0,000	0,00	0,0	0,34	1,70
2	2	6,1	14,9	3,00	12,01	3,60	37,5	4,48	22,42
4	2	3,8	9,3	3,00	15,75	4,73	49,2	3,20	16,00
6	2	3,7	9,1	3,00	17,45	5,24	54,5	2,72	13,60
8	2	3,5	8,6	3,00	21,91	6,57	68,5	2,57	12,86
12	2	3,3	8,1	3,00	25,30	7,59	79,1	2,43	12,13
24	2	3,2	7,8	3,00	27,55	8,27	86,1	2,35	11,76
48	2	3,0	7,4	3,00	28,76	8,63	89,9	2,21	11,03
TOTAL						8,63	89,9	19,96	99,79

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12, también se presenta una variación de extracción de cobre en el tiempo, llegando a una recuperación máxima de 89,9 % a las 48 horas.

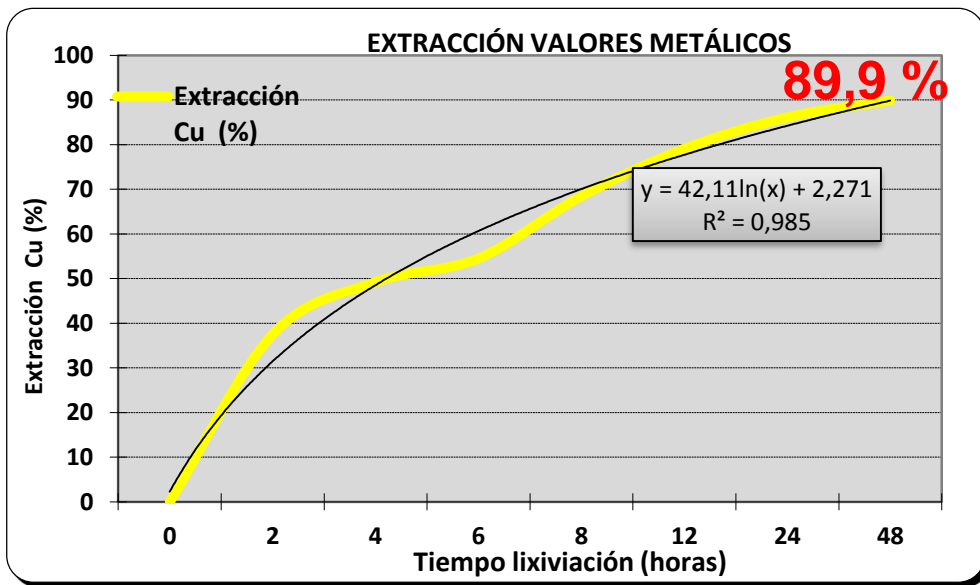


Figura 12. Extracción de cobre de minerales oxidados de cobre (a)
Fuente: Elaboración propia.

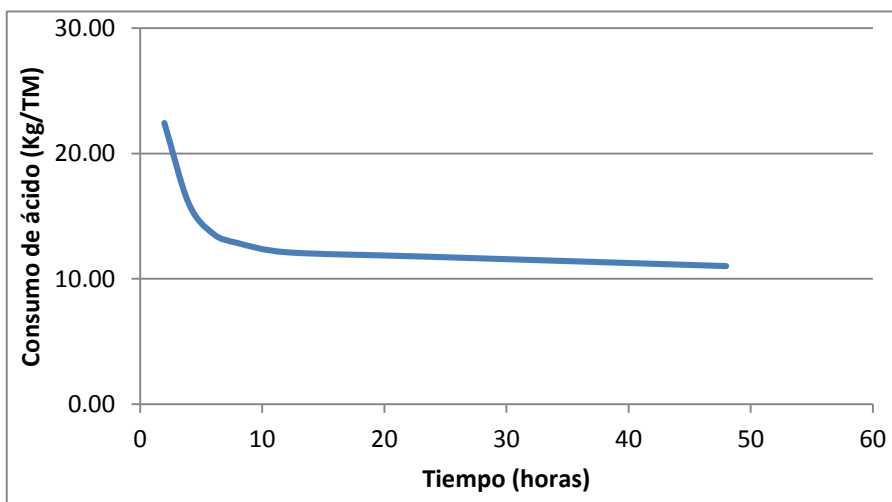


Figura 13. Extracción de cobre de minerales oxidados de cobre (b)
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13, se observa la variación del consumo de ácido sulfúrico con respecto al tiempo en la disolución del cobre.

4.5. Lixiviación en columnas

Se programaron 3 pruebas de lixiviación, a diferentes granulometrías logrando resultados adecuados.

Tabla 11.

Condición de la prueba 1 en columna (m ¾")

	Entrada	Salida	Recuperación
Muestra: Mineral oxidado de cobre (100% -m 1")			
Curado: 24 h			
Riego l/min.m ² : 0,700			
Densidad aparente :0,700			
Altura efectiva Columna (m): 2,070			
Diámetro columna 4" (m): 0,102			
Área de columna m² : 0,008			
Flujo (ml/día): 8172			
Peso de muestra Kg	13,43	14,75	
Humedad, % H₂O	4,00	11,10	
Peso del mineral seco	12,89	13,12	
TCu, %	4,80	0,02	99,57
ASCu, %	4,10	0,08	98,05
CNSCu, %	4,30	0,26	93,95
TCu, g	618,66	2,73	
ASCu, g	528,44	10,49	
CNSCu, g	554,21	34,10	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla número 12, se observa los resultados de diferentes pruebas que se ha realizado a nivel de laboratorio, donde muestra la variación de ácido , cobre,

hierro en el tiempo, así mismo la recuperación de cobre va variando la granulometría para cada tabla mencionada.

Tabla 12.

Resultados de las pruebas en columna -m1/2" (100 % pasante)

DÍAS	SOLUCION LIXIVIANTE				SOLUCIÓN PLS					RECUPERACION DE COBRE			
	Vol. I	Análisis químico, g/l			Vol. I	Análisis químico, g/l				Gramos		%	
		Ac	Cu	Fe ³⁺		Ac	Cu	Fe ²⁺	Fe ³⁺	parcial	Acum	parcial	Acum
1	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	8,1	0,0	0,0	0,0	1,20	50,90	16,45	2,84	3,10	19,74	19,74	3,19	3,19
3	8,00	0,0	0,0	0,0	2,50	49,66	20,4	2,84	3,50	51,00	51,00	8,24	8,24
4	7,90	0,0	0,0	0,0	4,60	49,04	16,60	2,70	3,5	76,36	127,36	12,34	20,59
5	7,80	0,0	0,0	0,0	5,00	18,74	13,20	2,50	3,20	66,00	193,36	10,67	31,25
6	8,00	0,0	0,0	0,0	6,00	9,85	11,30	2,30	3,60	67,80	261,16	10,96	42,21
7	7,60	0,0	0,0	0,0	7,10	8,70	7,30	2,40	3,59	51,83	312,99	8,38	50,59
8	7,70	0,0	0,0	0,0	7,40	8,54	3,70	2,30	3,66	27,38	340,37	4,43	55,02
9	7,60	0,0	0,0	0,0	7,30	7,90	2,90	2,25	3,20	21,17	361,54	3,42	58,44
10	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	7,42	1,80	2,20	3,60	13,32	374,86	2,15	60,59
11	7,50	0,0	0,0	0,0	7,10	6,7	1,69	2,15	3,50	12,00	386,86	1,94	62,53
12	8,10	0,0	0,0	0,0	8,00	5,78	1,76	2,10	3,47	14,08	400,94	2,28	64,81
13	8,10	0,0	0,0	0,0	8,10	5,50	1,60	2,20	3,46	12,96	413,90	2,09	66,90
14	8,00	0,0	0,0	0,0	7,90	5,22	1,40	2,12	3,45	11,06	424,96	1,79	6,69
15	8,10	0,0	0,0	0,0	7,70	4,94	1,38	2,10	3,45	10,63	435,59	1,72	70,41
16	8,00	0,0	0,0	0,0	7,70	4,66	1,25	2,08	3,44	9,63	445,21	1,56	71,96
17	7,50	0,0	0,0	0,0	7,10	4,38	1,14	2,06	3,43	8,09	453,30	1,31	73,27
18	7,60	0,0	0,0	0,0	7,20	4,10	1,01	2,04	3,42	7,27	460,58	1,18	74,45
19	7,70	0,0	0,0	0,0	7,30	3,82	0,91	2,02	3,41	6,64	467,22	1,07	75,52
20	7,80	0,0	0,0	0,0	7,50	3,54	0,80	2,00	3,41	6,00	473,22	0,97	76,49
21	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	3,26	0,83	1,98	3,40	6,14	479,36	0,99	77,48
22	7,90	0,0	0,0	0,0	7,40	2,98	0,91	1,96	3,39	6,73	486,10	1,09	78,57
23	7,90	0,0	0,0	0,0	7,40	2,7	0,90	1,94	3,38	6,66	492,76	1,08	79,65
24	8,10	0,0	0,0	0,0	8,00	2,42	0,80	1,92	3,37	6,40	499,16	1,03	80,68
25	8,10	0,0	0,0	0,0	7,90	2,14	0,95	1,90	3,37	7,51	506,66	1,21	81,90
26	8,00	0,0	0,0	0,0	7,60	1,86	0,92	1,88	3,36	6,99	513,65	1,13	83,03
27	7,90	0,0	0,0	0,0	7,60	1,58	0,91	1,86	3,35	6,92	520,57	1,12	84,14
28	7,80	0,0	0,0	0,0	7,60	1,30	0,82	1,84	3,34	6,15	526,72	0,99	85,14
29	7,70	0,0	0,0	0,0	7,40	1,02	0,79	1,82	3,33	5,85	532,56	0,94	86,08
30	7,80	0,0	0,0	0,0	7,50	0,74	0,70	1,72	3,23	5,25	537,81	0,85	86,93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13.

Balance metalúrgico por soluciones de prueba 2

	Entrada	Salida	Recuperación
Muestra: Mineral oxidado de cobre (100% -m 1")			
Curado: 24 h			
Riego l/min.m ² : 0,700			
Densidad aparente :0,700			
Altura efectiva Columna (m): 2,070			
Diámetro columna 4" (m): 0,102			
Área de columna m² : 0,008			
Flujo (ml/día): 8172			
Peso de muestra Kg	13,43	14,75	
Humedad, %H₂O	4,00	11,10	
Peso del mineral seco	12,89	13,12	
TCu, %	4,8	0,02	99,57
ASCu, %	4,10	0,08	98,05
CNSCu, %	4,30	0,26	93,95
TCu, g	618,66	2,73	
ASCu, g	528,44	10,49	
CNSCu, g	554,21	34,10	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14.

Resultados de las pruebas en columna –m3/4" (100 % pasante)

LIX	SOLUCIÓN LIXIVIANTE				SOLUCIÓN PLS					RECUPERACION DE COBRE			
	Vol. l	Análisis químico, g/l			Vol. l	Análisis químico,, g/l				Gramos		%	
		Ac	Cu	Fe ³⁺		l	Ac	Cu	Fe ²⁺	Fe ³⁺	parcial	Acum	parcial
1	9,20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	8,80	0,0	0,0	0,0	0,90	51,20	13,00	0,00	0,00	11,7	11,7	1,89	1,89
3	9,10	0,0	0,0	0,0	1,70	51,10	16,30	2,54	2,90	27,71	27,71	4,48	4,48
4	9,00	0,0	0,0	0,0	3,90	49,04	14,40	2,54	3,30	56,16	83,87	9,08	13,56
5	9,20	0,0	0,0	0,0	4,50	19,14	13,70	2,40	3,30	61,65	145,52	9,97	23,52
6	9,30	0,0	0,0	0,0	5,50	10,45	11,20	2,20	3,00	61,6	207,12	9,96	33,48
7	7,60	0,0	0,0	0,0	7,20	9,40	8,50	2,00	3,40	61,2	268,32	9,89	43,37
8	7,70	0,0	0,0	0,0	7,20	8,54	5,40	2,10	3,39	38,88	307,2	6,28	49,66
9	7,60	0,0	0,0	0,0	7,20	7,90	3,10	2,00	3,46	22,32	329,52	3,61	53,26
10	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	7,42	2,30	1,95	3,00	17,02	346,54	2,75	56,01
11	7,50	0,0	0,0	0,0	7,30	6,70	1,70	1,90	3,40	12,41	358,95	2,01	58,02
12	8,10	0,0	0,0	0,0	7,70	5,78	1,68	1,85	3,30	12,94	371,89	2,09	60,11
13	8,10	0,0	0,0	0,0	8,00	5,50	1,60	1,80	3,27	12,80	384,69	2,07	62,18
14	8,00	0,0	0,0	0,0	8,10	5,22	1,30	1,90	3,26	10,53	395,22	1,70	63,88
15	8,10	0,0	0,0	0,0	7,60	4,94	1,20	1,82	3,25	9,12	404,34	1,47	65,36
16	8,00	0,0	0,0	0,0	7,40	4,66	1,15	1,80	3,25	8,51	412,85	1,38	66,73
17	7,50	0,0	0,0	0,0	7,30	4,38	1,20	1,78	3,24	8,76	421,61	1,42	68,15
18	7,60	0,0	0,0	0,0	7,20	4,10	1,01	1,76	3,23	7,27	428,88	1,18	69,32
19	7,70	0,0	0,0	0,0	7,40	3,82	0,96	1,74	3,22	7,10	435,98	1,15	70,47
20	7,80	0,0	0,0	0,0	7,60	3,54	0,93	1,72	3,21	7,07	443,05	1,14	71,61
21	7,80	0,0	0,0	0,0	7,50	3,26	0,91	1,70	3,21	6,83	449,88	1,10	72,72
22	7,90	0,0	0,0	0,0	7,60	2,98	0,89	1,68	3,20	6,76	456,64	1,09	73,81
23	7,90	0,0	0,0	0,0	7,90	2,70	0,87	1,66	3,19	6,87	463,51	1,11	74,92
24	8,10	0,0	0,0	0,0	8,00	2,42	0,85	1,64	3,18	6,80	470,31	1,10	76,02
25	8,10	0,0	0,0	0,0	7,60	2,14	0,83	1,62	3,17	6,31	476,62	1,02	77,04
26	8,00	0,0	0,0	0,0	7,50	1,86	0,81	1,60	3,17	6,08	482,70	0,98	78,02
27	7,90	0,0	0,0	0,0	7,50	1,58	0,80	1,58	3,16	6,00	488,70	0,97	78,99
28	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	1,30	0,79	1,56	3,15	5,85	494,54	0,94	79,94
29	7,70	0,0	0,0	0,0	7,30	1,02	0,75	1,54	3,14	5,48	500,02	0,88	80,82
30	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	0,74	0,73	1,52	3,13	5,40	505,42	0,87	81,70

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15.

Balance metalúrgico por soluciones de la prueba 3

	Entrada	Salida	Recuperación
Muestra: Mineral oxidado de cobre (100% -m 1")			
Curado: 24 h			
Riego l/min.m ² : 0,700			
Densidad aparente :0,700			
Altura efectiva Columna (m): 2,070			
Diámetro columna 4" (m): 0,102			
Área de columna m² : 0,008			
Flujo (ml/día): 8172			
Peso de muestra Kg	13,43	14,75	
Humedad, %H₂O	4,00	11,10	
Peso del mineral seco	12,89	13,12	
TCu, %	4,8	0,02	99,57
ASCu, %	4,10	0,08	98,05
CNSCu, %	4,30	0,26	93,95
TCu, g	618,66	2,73	
ASCu, g	528,44	10,49	
CNSCu, g	554,21	34,10	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16.

Resultados de las pruebas en columna – m1" (100 % pasante)

DÍAS	SOLUCIÓN LIXIVIANTE				SOLUCIÓN PLS					RECUPERACIÓN DE COBRE			
	Vol.	Análisis Químico, g/l			Vol.	Análisis Químico, g/l				Gramos		%	
		l	Ac	Cu		Fe ³⁺	l	Ac	Cu	Fe ²⁺	Fe ³⁺	parcial	Acum
1	9,20	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00
2	8,80	0,0	0,0	0,0	0,90	53,80	12,34	0,00	0,00	11,106	11,1	1,80	1,80
3	9,10	0,0	0,0	0,0	1,70	52,50	14,60	2,44	2,80	24,82	24,8	4,01	4,01
4	9,00	0,0	0,0	0,0	3,90	51,30	13,20	2,44	3,20	51,48	76,3	8,32	12,33
5	9,20	0,0	0,0	0,0	4,50	21,14	12,50	2,30	3,20	56,25	132,6	9,09	21,43
6	9,30	0,0	0,0	0,0	5,50	12,20	10,60	2,10	2,90	58,3	190,9	9,42	30,85
7	7,60	0,0	0,0	0,0	7,20	10,40	8,12	1,90	3,30	58,464	249,3	9,45	40,30
8	7,70	0,0	0,0	0,0	7,20	8,50	4,90	2,00	3,29	35,28	284,6	5,70	46,00
9	7,60	0,0	0,0	0,0	7,20	7,80	2,70	1,90	3,36	19,44	304,0	3,14	49,14
10	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	7,60	2,42	1,85	2,90	17,908	321,9	2,89	52,04
11	7,50	0,0	0,0	0,0	7,30	6,70	1,50	1,80	3,30	10,95	332,9	1,77	53,81
12	8,10	0,0	0,0	0,0	7,70	5,80	1,40	1,75	3,20	10,78	343,7	1,74	55,55
13	8,10	0,0	0,0	0,0	8,00	5,50	1,23	1,70	3,17	9,84	353,5	1,59	57,14
14	8,00	0,0	0,0	0,0	8,10	5,20	1,11	1,80	3,16	8,99	362,5	1,45	58,59
15	8,10	0,0	0,0	0,0	7,60	4,94	0,90	1,72	3,15	6,84	369,3	1,11	59,70
16	8,00	0,0	0,0	0,0	7,40	4,30	0,85	1,70	3,15	6,29	375,6	1,02	60,72
17	7,50	0,0	0,0	0,0	7,30	4,20	0,79	1,68	3,14	5,77	381,4	0,93	61,65
18	7,60	0,0	0,0	0,0	7,20	4,10	0,79	1,66	3,13	5,69	387,1	0,92	62,57
19	7,70	0,0	0,0	0,0	7,40	3,72	0,79	1,64	3,12	5,85	392,9	0,94	63,51
20	7,80	0,0	0,0	0,0	7,60	3,44	0,79	1,62	3,11	6,00	398,9	0,97	64,48
21	7,80	0,0	0,0	0,0	7,50	3,30	0,79	1,60	3,11	5,93	404,9	0,96	65,44
22	7,90	0,0	0,0	0,0	7,60	2,48	0,79	1,58	3,10	6,00	410,9	0,97	66,41
23	7,90	0,0	0,0	0,0	7,90	2,70	0,79	1,56	3,09	6,24	417,1	1,01	67,42
24	8,10	0,0	0,0	0,0	8,00	2,42	0,79	1,54	3,08	6,32	423,4	1,02	68,44
25	8,10	0,0	0,0	0,0	7,60	2,10	0,79	1,52	3,07	6,00	429,4	0,97	69,41
26	8,00	0,0	0,0	0,0	7,50	1,60	0,79	1,50	3,07	5,93	435,4	0,96	70,37
27	7,90	0,0	0,0	0,0	7,50	1,50	0,78	1,48	3,06	5,85	441,2	0,95	71,32
28	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	1,20	0,75	1,46	3,05	5,55	446,8	0,90	72,21
29	7,70	0,0	0,0	0,0	7,30	1,02	0,75	1,44	3,04	5,48	452,2	0,88	73,10
30	7,80	0,0	0,0	0,0	7,40	0,71	0,73	1,42	3,03	5,40	457,6	0,87	73,97

Fuente: Elaboración propia

En la figura 14 (prueba 1), se observa la mejor recuperación de cobre, llegando a 86,94 % con respecto a la figura 15 (prueba 2), y figura 16 (prueba3), se debe a las mayor área superficial expuesta de la partícula a ser lixiviada, incrementado la velocidad de reacción en la disolución del metal.

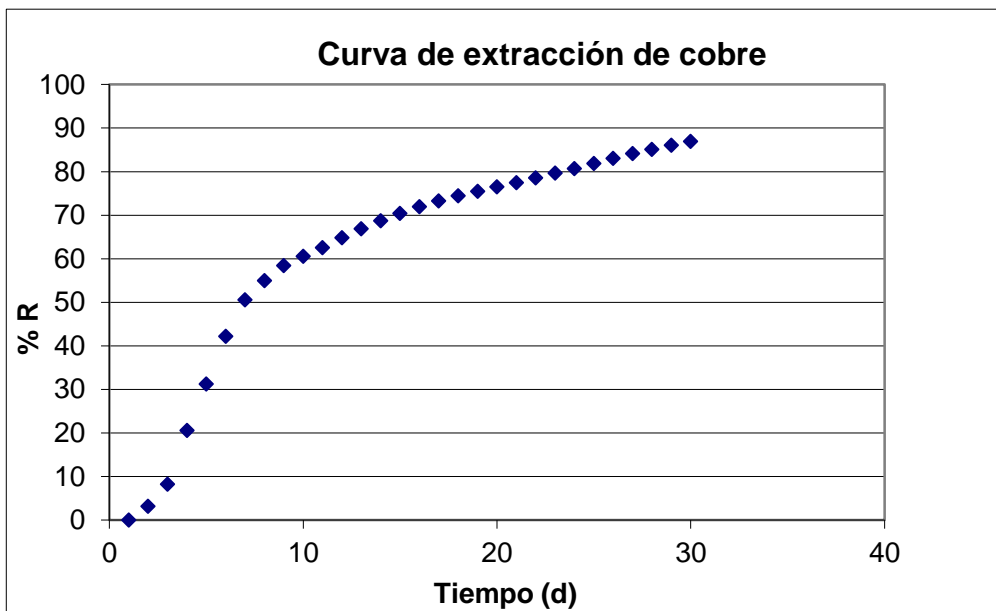


Figura 14. Prueba 1, curva de extracción de cobre.
Fuente: Elaboración propia.

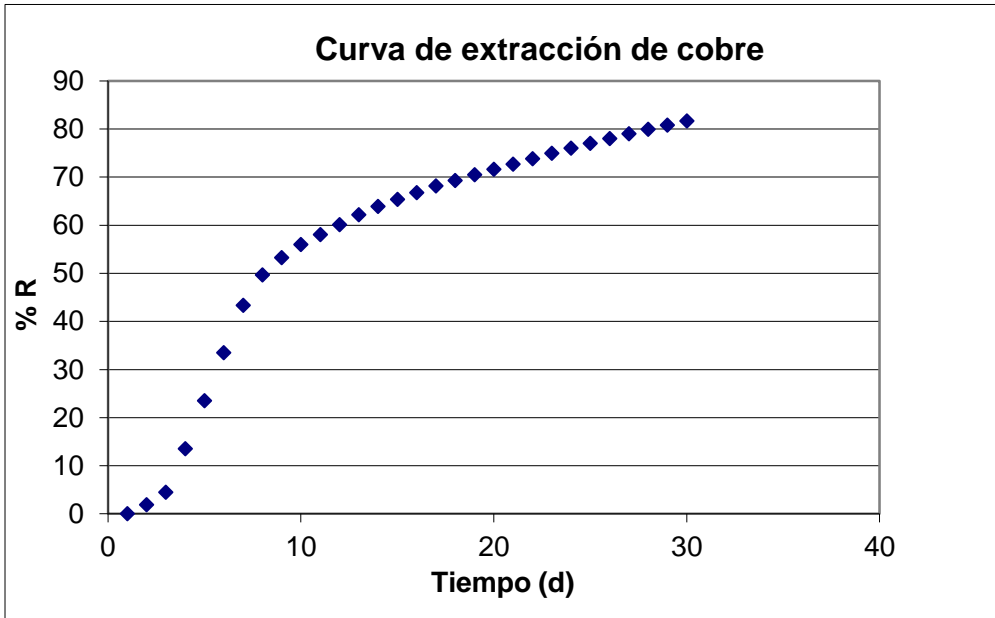


Figura 15. Prueba 2, curva de extracción de cobre.
Fuente: Elaboración propia

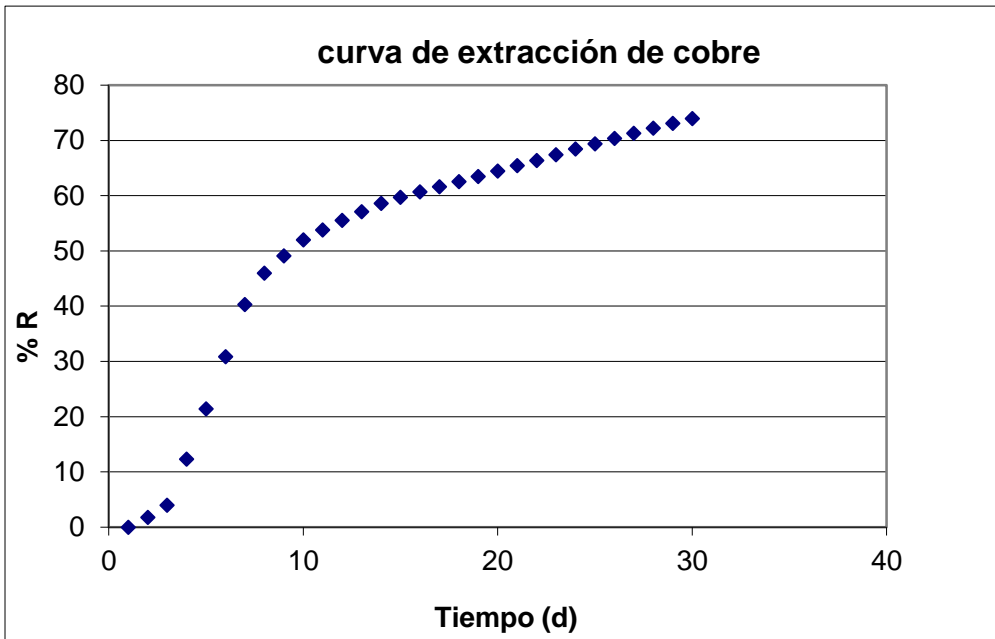


Figura 16. Prueba 3, curva de extracción de cobre.
Fuente: Elaboración propia

4.6. Modelo matemático (lixiviación en columna)

Existen dos modelos idealizados que permiten representar la lixiviación de un mineral, por lo que se permite cuantificar el comportamiento del núcleo sin reaccionar y se ajusta mejor el control por difusión, ver la figura 17.

La tabla N° 17, describe el tiempo de lixiviación y recuperación para las mallas 1/2", 3/4" y 1", también incluye la fracción molar de convección del mineral y así mismo los modelos de núcleo sin reaccionar, aplicando a los resultados obtenidos donde se quiere definir cuál es la etapa controlante del proceso, comparando estos resultados con otros trabajos realizados, se puede ver que la etapa controlante es por difusión, tal como se expresa en este trabajo.

Tabla 17.

Modelo cinético del núcleo sin reaccionar.

DÍAS LIX	RECUPERACIÓN			RECUPERACIÓN EN FRACCIÓN			MODELO CINETICO DEL NUCLEO SIN REACCIONAR						
	%	%	%	XB	XB	XB	CONTROL DIFUCIONAL			CONTROL QUIMICO			
	1/2"	3/4"	1"	1/2"	3/4"	1"	1-3(1- X_B) ² /3+2(1- X_B)			(1-(1- X_B)) ^{1/3}			
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	3,19	1,89	1,80	0,03	0,02	0,02	0,000	0,000	0,000	0,011	0,006	0,006	0,006
3	8,24	4,48	4,01	0,08	0,04	0,04	0,002	0,001	0,001	0,028	0,015	0,014	0,014
4	20,59	13,56	12,33	0,21	0,14	0,12	0,016	0,007	0,005	0,074	0,047	0,043	0,043
5	31,25	23,52	21,43	0,31	0,24	0,21	0,038	0,021	0,017	0,117	0,086	0,077	0,077
6	42,21	33,48	30,85	0,42	0,33	0,31	0,074	0,044	0,037	0,167	0,127	0,116	0,116
7	50,59	43,37	40,30	0,51	0,43	0,40	0,113	0,079	0,067	0,209	0,173	0,158	0,158
8	55,02	49,66	46,00	0,55	0,50	0,46	0,138	0,108	0,091	0,234	0,204	0,186	0,186
9	58,44	53,26	49,14	0,58	0,53	0,49	0,160	0,128	0,106	0,254	0,224	0,202	0,202
10	60,59	56,01	52,04	0,61	0,56	0,52	0,176	0,145	0,121	0,267	0,239	0,217	0,217
11	62,53	58,02	53,81	0,63	0,58	0,54	0,190	0,158	0,131	0,279	0,251	0,227	0,227
12	64,81	60,11	55,55	0,65	0,60	0,56	0,208	0,172	0,142	0,294	0,264	0,237	0,237
13	66,90	62,18	57,14	0,67	0,62	0,57	0,227	0,187	0,152	0,308	0,277	0,246	0,246
14	68,69	63,88	58,60	0,69	0,64	0,59	0,243	0,201	0,162	0,321	0,288	0,255	0,255
15	70,41	65,36	59,70	0,70	0,65	0,60	0,260	0,213	0,169	0,334	0,298	0,261	0,261
16	71,96	66,73	60,72	0,72	0,67	0,61	0,276	0,225	0,177	0,346	0,307	0,268	0,268
17	73,27	68,15	61,65	0,73	0,68	0,62	0,290	0,238	0,183	0,356	0,317	0,273	0,273
18	74,45	69,32	62,57	0,74	0,69	0,63	0,303	0,249	0,190	0,365	0,326	0,279	0,279
19	75,52	70,47	63,51	0,76	0,70	0,64	0,316	0,260	0,198	0,374	0,334	0,285	0,285
20	76,50	71,61	64,48	0,76	0,72	0,64	0,328	0,272	0,206	0,383	0,343	0,292	0,292
21	77,49	72,72	65,44	0,77	0,73	0,65	0,340	0,284	0,214	0,392	0,351	0,298	0,298
22	78,58	73,81	66,41	0,79	0,74	0,66	0,354	0,296	0,222	0,402	0,360	0,305	0,305
23	79,65	74,92	67,42	0,80	0,75	0,67	0,369	0,309	0,231	0,412	0,369	0,312	0,312
24	80,69	76,02	68,44	0,81	0,76	0,68	0,384	0,322	0,241	0,422	0,379	0,319	0,319
25	81,90	77,04	69,41	0,82	0,77	0,69	0,402	0,334	0,250	0,434	0,388	0,326	0,326
26	83,03	78,02	70,37	0,83	0,78	0,70	0,420	0,347	0,259	0,446	0,397	0,333	0,333
27	84,15	78,99	71,32	0,84	0,79	0,71	0,438	0,360	0,269	0,459	0,406	0,341	0,341
28	85,14	79,94	72,21	0,85	0,80	0,72	0,456	0,373	0,278	0,470	0,415	0,347	0,347
29	86,09	80,82	73,10	0,86	0,81	0,73	0,473	0,386	0,288	0,482	0,423	0,354	0,354
30	86,94	81,70	73,96	0,87	0,82	0,74	0,489	0,399	0,297	0,493	0,432	0,361	0,361

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 17, se puede observar las curvas de fracción de concentración vs tiempo donde se aplica el modelo de niveles sin reaccionar, control difusional en la extracción del cobre, donde la mayor fracción de convección se realiza en los minerales $-m1/2$ al 100 % pasante.

En la figura 17 y 18 se ve claramente para la granulometría de $1/2$ y $3/4$ y 1 , el control de proceso es por control difusión obteniendo el coeficiente de correlación más alto en la figura 17.

En la figura 18, se puede observar las curvas de fracción, concentrado vs tiempo donde se aplica el modelo de niveles sin reaccionar, control químico en la extracción del cobre, donde la mayor fracción de convección se realiza en los minerales $-m1/2$ al 100 % pasante.

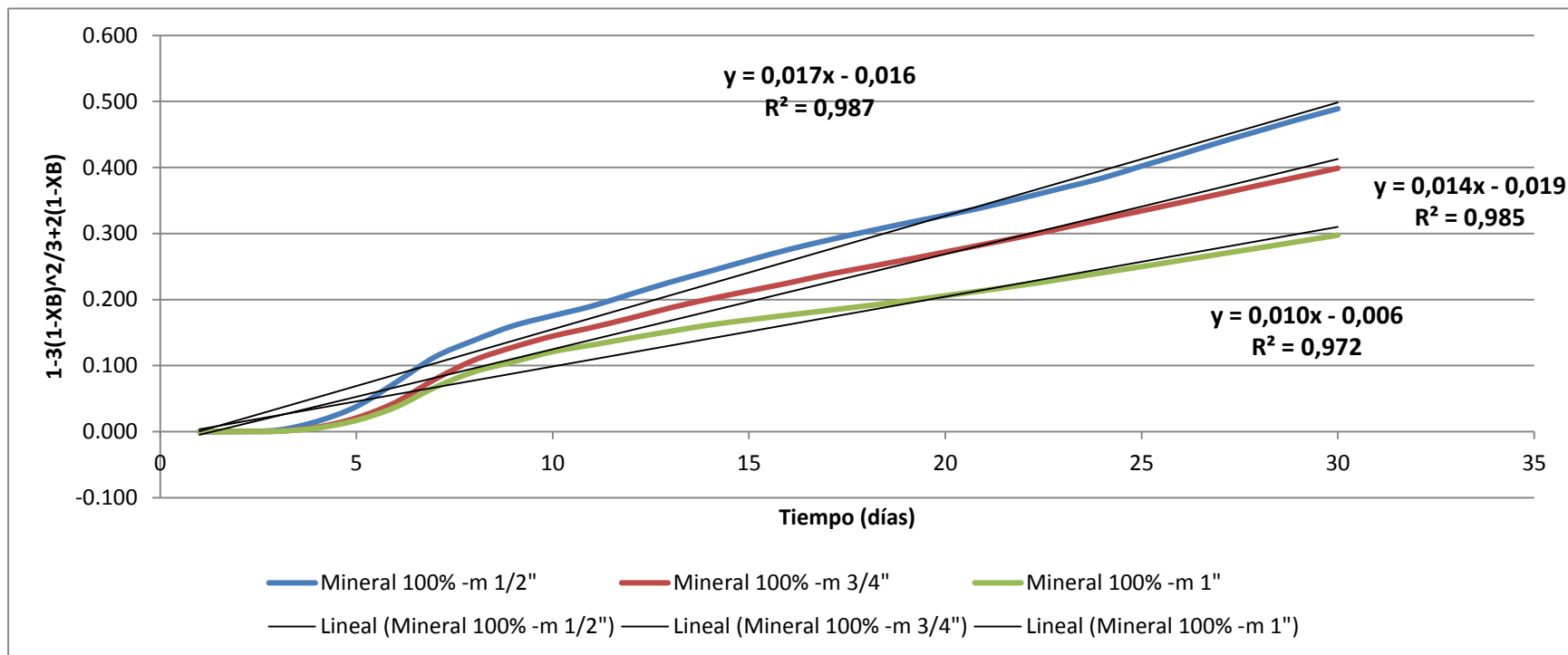


Figura 17. Curva de modelo cinético núcleo sin reaccionar “Control difusional” en la extracción de cobre.

Fuente: Elaboración propia

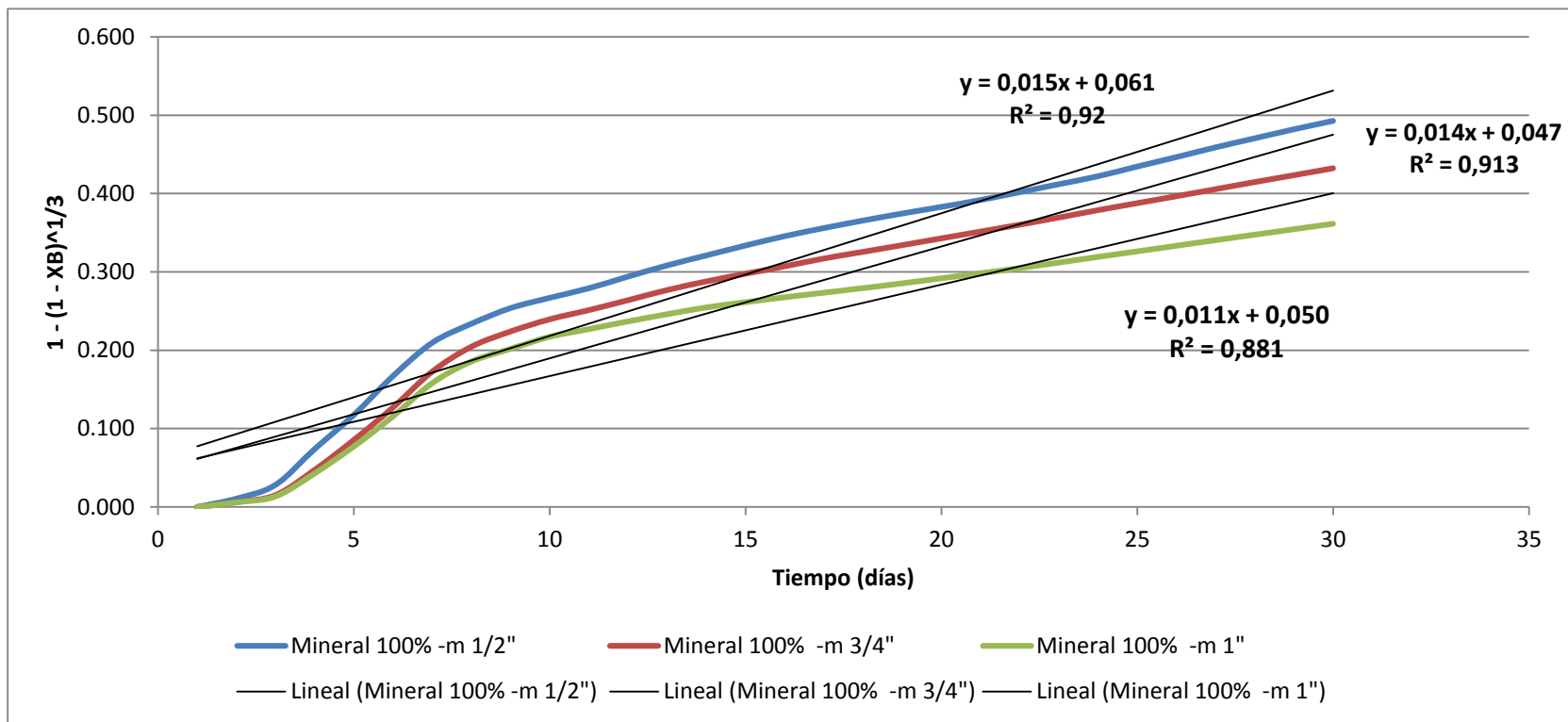


Figura 18. Curva de modelo cinético núcleo sin reaccionar “control químico” en la extracción de cobre.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se determinó el consumo de ácido sulfúrico a nivel de laboratorio, mediante pruebas de lixiviación en botella, llegando a un consumo de 99,79 kilos de ácido por tonelada de mineral.

Estudio de la cinética de disolución del mineral oxidado de cobre a los 30 días lixiviación se llega a una extracción de 86,93 % de cobre, con el mineral 100 % -m 0,0127 m (1/2”).

Las diferentes granulometrías de mineral, indican claramente que a menor granulometría mejora la recuperación.

Se determinó que la etapa controlante de la lixiviación de estos minerales oxidados de cobre en la cinética de disolución de cobre, el control es por difusión.

Un estudio cinético como el que se realizó en este trabajo brinda información relevante sobre el comportamiento de un mineral bajo condiciones controladas, que puede ser aplicada en el diseño de las soluciones en los procesos de producción de cobre mediante la vía hidrometalurgia, aumenta la lixiviación de

cobre y disminuyendo el consumo de ácido sulfúrico, es decir, mejorando la economía de todo proceso. Con respecto a lo mencionado si deseamos incrementar la producción es necesario tener en cuenta y entender la cinética de todo proceso.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar pruebas adicionales para evaluar el efecto que tiene otros parámetros no considerados en el proyecto tales como, (otros valores de riego.)

Se recomienda evaluar la ganga del mineral de la zona Sama Inclán, debido a la alta ley, consumo de ácido sulfúrico.

Instalación de una planta industrial, obteniendo sulfato de cobre de un producto de cobre catódico debido a su buena ley.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anon, (2017). [online] Available at: <http://> Biswas K. A. Davenport G. W Ed. Limusa,(1993, pp. 282-286) “El Cobre Metalurgia extractiva”, [Accessed 12 Jun. 2017].
- Cudennec, Y. And Lecerf, a. (2003). transformación del Cu (OH) 2 en CuO. Ciencias del Estado Sólido, 5(11 y 12), pp.1471-1474.
- Evans, D. (1968). Producción de metales por Reducción Gaseosa a partir de Solución-Procesos y Química. 1st ed. London: Avances en Metalurgia Extractiva, La Institución de Minería y Metalurgia, 44 Portland Place, pp.831.840-844.846-850, 888-893.
- Habashi, F. (1999). *Hydrometallurgy*. 2nd ed. canada, pp.128,140-141,273.
- Ipinza. A, J. (2005). “HIDROMETALURGIA I”. “Informe Anual (2007)”.Cámara Minera de México.
- Lynn, N. S. (1997), Curso de Actualización, TECSUP *Lixiviación de Minerales* Lima.25.
- Márquez, O. and Contreras, O. (2011). “Análisis de aplicabilidad de la cementación de metales desde diversos tipos de solución”. In: XX Congreso Internacional en Metalurgia Extractiva. México.

- Ortiz Martínez, A. (2012). "Lixiviación Ácida de Minerales Oxidados de Cobre (Crisocola) con poca disolución de Fe al utilizar KHSO_4 ". Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM, PP. 52-55.
- Ortega Espinoza, O. (2001). "Obtención de MnO_2 grado batería partiendo de un mineral de baja ley". Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM, pp.10.
- Ornelas Tabares, J. (1985). "Desarrollo en el proceso de cementación para Cu y Zn" III Encuentro sobre concentración de minerales, Instituto de Metalurgia, Universidad de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P. México.
- Van Arsdale, G. (1965). hidrometalurgia de metales comunes. 1st ed. México: hispano Americana, pp.76,329.
- Villar Andrade, A. (2009). Lixiviación alcalina con Hidróxido de Sodio de un Sulfuro Pb-Zn parcialmente oxidado y recuperación de los valores metálicos por cementación con aluminio. Licenciatura. UNAM, Facultad de ingeniería.
- J. Izquierdo, (2004).Control difusional a través de la capa de ceniza. La ordenada del gráfico corresponde a la concentración del reactante en la fase líquida y al interior de la partícula; la abscisa corresponde a la posición radial de la partícula esférica.
- J. Ipinza, (2005) Principales minerales consumidores de ácido y sus características de neutralización.

ANEXO

1. Procedimiento determinación del consumo de ácido (H_2SO_4) GPL

- 1) Medir con una pipeta 2 ml de la solución lixiviada en un matraz de 250 ml.
- 2) Agregue 50 ml de agua destilada.
- 3) Agregue 4 gotas de Anaranjado de metilo.
- 4) Inmediatamente titular con solución valorada de 0,1 N de hidróxido de sodio (color de rojo cambie a naranja).

$$1 \text{ ml NaOH } 0,1 \text{ N} = 0,0049 \text{ g de } H_2SO_4$$

$$[H_2SO_4]_{gpl} = V_{gastado} \cdot factor$$

$$[H_2SO_4]_{gpl} = \frac{V_{gastado}(ml) \cdot factor \cdot 49}{V_{muestra}(ml)}$$

$$\frac{PM \ H_2SO_4}{P.E.H_2SO_4}$$

Nº Eq.

$$\text{Consumo } H_2SO_4 = H_2SO_{4INICIAL} - H_2SO_{4FINAL}$$

2. Procedimiento determinación de cobre soluble

- 1) Se toma una muestra de 20 g.

- 2) En un vaso de 400 ó 500 ml preparar 300 ml de H_2SO_4 diluido al 5 %. Separar 15 ml para determinar el ácido libre en gpl (Concentración de ácido inicial).

Procedimiento de preparación del H_2SO_4 al 5 %.

En 15 ml de $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{c})$, enrazar a 300 ml con H_2O destilada. $15/300 = 0,05$.

- 3) Agregar la muestra en la solución ácida.
- 4) Agitar de 6 a 8 h
- 5) Una vez terminada la agitación se filtra para obtener la solución lixiviada.
- 6) Realizar Análisis Químico para determinar el cobre soluble y el consumo de ácido de la solución lixiviada.

3. Procedimiento determinación del cobre en el PLS

- 1) Medir con una pipeta 5 ml de PLS en un matraz de 250 ml.
- 2) Agregue 2 ml de solución sulfonítrica (HNO_3 y H_2SO_4 3:1).
- 3) Colocar a la plancha y llevar a sequedad total.
- 4) Retirar de la plancha y enfriar.
- 5) Agregar 20 ml de agua destilada.
- 6) Agregar 5 gotas de H_2SO_4 1:1.
- 7) Calentar hasta que la solución empiece a hervir.
- 8) Retirar de la plancha y enfriar.
- 9) Neutralizar con 5 ml de hidróxido de amonio
- 10) Acidificar con 10 ml de ácido acético.

- 11) Agregar 1 g de fluoruro de sodio o hasta que la solución tome una coloración celeste.
- 12) Agregar 4 g de Yoduro de potasio.
- 13) Titular con tiosulfato de sodio débil.
- 14) Usar como indicador el almidón.

$$[Cu]_{gpl} = V_{gastado} \cdot factor$$

$$[Cu]_{gpl} = \frac{V_{gastado}(ml) \cdot factor \cdot 1000}{V_{muestra}(ml)}$$

4. Procedimiento determinación del ion ferroso GPL

- 1) Mida 2 ml de muestra con una pipeta volumétrica en un vaso de 400 ml.
- 2) Añada 100 ml de agua destilada.
- 3) Adicionar 10 ml de solución sulfofosfórica, agite con precaución.
- 4) Agregue 10 gotas de indicador de difenilamina de sodio.
- 5) Titule con la solución dicromato de potasio valorada hasta viraje de incoloro a azul – violeta permanente (la solución virará a verde, poco antes del final de la titulación).

$$[Fe^{+2}]_{gpl} = V_{gastado} \cdot factor$$

5. Procedimiento determinación del hierro total por volumetría

- 1) Mida 2 ml de muestra con una pipeta volumétrica en un vaso de 250 ml.

- 2) Agregue 2 ml de solución sulfonítrica (HNO_3 y H_2SO_4 3:1, más 2 ml HCl).
- 3) Coloque el vaso a calentar en la plancha, tapado con una luna de reloj, y llevar a pastoso.
- 4) Retirar el vaso de la plancha y dejar enfriar.
- 5) Agregar 100 ml de agua destilada.
- 6) Agregue 10 ml ácido clorhídrico concentrado.
- 7) Agregue aprox. 10 g de granallas de plomo.
- 8) Ponga el vaso a calentar en la plancha, cubierto con una luna reloj.
- 9) Hierva por 15 minutos hasta que la solución quede incolora.
- 10) Retirar el vaso de la plancha y dejar enfriar.
- 11) Transvase la solución a un vaso de 400 ml y lavar cuatro veces el vaso inicial (no deje que pase plomo al segundo vaso).
- 12) Agregar 10 ml de solución sulfofosfórica (700 ml H_2O + 150 ml H_2PO_3 + 150 ml H_2SO_4).
- 13) Agregue 10 gotas de indicador de difenilamina de sodio.
- 14) Titule con la solución dicromato de potasio valorada hasta viraje de incoloro a azul – violeta permanente (la solución virará momentáneamente a verde, esto ocurre al punto final de la titulación).

$$[\text{Fierro Total}]_{gpl} = V_{gastado} \cdot factor$$

6. Procedimiento determinación del cobre oxidado total

- 1) Pesar 2 g de muestra (-m100) y pasar a un vaso de 250 ml.
- 2) Atacar con 20 ml de H₂SO₄ al 5 % en volumen y llevar a agitación por espacio de 30 min.
- 3) Filtrar en papel filtro Whatman N° 4, Lavar el filtro 3 veces con agua destilada caliente.
- 4) Agregar a la solución filtrada 10 ml de Agua de Bromo (1 %) y llevar a sequedad pastosa.
- 5) Lavar las paredes del vaso con agua destilada y llevar a calentamiento para que se disuelvan las sales.
- 6) Agregar 3-5 gotas de H₂SO₄ (1:1) a fin de formar la sal cúprica.
- 7) Agregar NH₄OH para precipitar el hierro y agregar ácido acético 10 ml.
- 8) Agregar aprox. 0,5 g de Fluoruro de Sodio y llevar a enfriamiento (en agua fría).
- 9) Agregar KI 10 ml (10 %).
- 10) Titular con solución de tiosulfato (3,9 g/l).
- 11) Agregar gotas de la solución Katz (almidón), cuando esté cerca del punto final y seguir titulando. El punto final se obtiene cuando la solución cambia de color azul violáceo a blanco lechoso.

$$[\%CuO] = \frac{Gasto(ml) \cdot factor \cdot (PM_{CuO} / PM_{Cu})}{Peso\ de\ muestra(g)} \cdot 100$$