



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES ÓXIDOS DE
COBRE CON AMINOÁCIDO GLUTAMATO MONOSÓDICO.**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. FREDY MAMANI LARICO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2019



DEDICATORIA

A mis padres por haberme inculcado los valores como la persona que soy en la actualidad muchos de mis logros se los debo a ustedes me formaron con reglas y algunas libertades, pero al final me motivaron a alcanzar mi objetivo.

Gracias Madre y Padre.

Fredy Mamani



AGRADECIMIENTOS

- Agradezco a mi madre, que como buena educadora sentó las bases para poderme desarrollar como una persona integral y responsable, inculcándome el respeto, salud, ser un buen estudiante, más que obtener logros académicos, significa ser una persona con valores. Su dedicación marco en mí una huella que jamás sabré como agradecerle.
- A mi padre, transportista quien me enseñó a pensar como una persona racional, a usar más la cabeza que la fuerza con su ingenio se ganó mi admiración. Su humildad e inteligencia son las metas que tengo en la vida.
- A mi hermano gemelo Bach. en Ingeniería Mecánica Eléctrica quien me enseñó que se debe tener paciencia tolerancia que con esfuerzo y dedicación se obtiene los objetivos.
- También quiero agradecer a mis amigos y amigas con los cuales he compartido el honor de ser estudiante de esta Facultad de Ingeniería Química a Dennis Vargas, Norma Ccari, Nora Churata, Darwin tite. Diego Sandoval, Elmer belizario.
- Finalmente, a mi asesor German Guille por haberme dado la responsabilidad de trabajar en este tema el cual espero seguir desarrollando en mi futuro profesional. Su ayuda y confianza fue fundamental para lograr terminar esta investigación. También quiero agradecer a los miembros del jurado Moisés Pérez Capa, Marleni Valencia Pacho, Luis Supo Quispe por darme importantes consejos para lograr esta investigación.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGREDECIMIENTOS	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
1.1.1. Objetivo general.....	15
1.1.2. Objetivo específico	15
CAPITULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES SOBRE LA LIXIVIACIÓN	16
2.1.1. Propiedades y usos del cobre	21
2.2. GLUTAMATO MONOSÓDICO	21
2.2.1. Propiedades físicas y químicas	22
2.3. GEOLÓGICA DEL YACIMIENTO DE COBRE	23
2.4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN UNA LIXIVIACIÓN	25
2.4.1. Tiempo de lixiviación	25
2.4.2. pH.....	25



2.4.3. Granulometría	26
2.4.4. Altura de la pila.....	26
2.4.5. Taza de riego	26
2.4.6. Concentración de ácido en la solución de riego.....	27
2.5. CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN	27
2.5.1. Definiciones	28
2.5.2. Cinética de disolución de óxidos de cobre.....	29
2.5.3. Modelos cinéticos de la lixiviación.....	31
2.5.4. Modelo de conversión progresiva	32
2.5.5. Modelo del núcleo sin reaccionar (<i>N.S.R.</i>).....	32
2.5.6. Comparación entre modelos y operación real.....	33
2.6. MODELO DEL NÚCLEO SIN REACCIONAR PARA PARTÍCULAS ESFÉRICAS DE TAMAÑO CONSTANTE	34
2.6.1. Control difusional	36
2.6.2. Control reacción química	39
2.6.3. Control mixto	41

CAPÍTULOS III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES.....	42
Materiales.....	42
Reactivos.....	42
Equipos.....	43
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.2.1. Toma de muestra.....	43
3.2.2. Ubicación de los socavones del Cerro Azoguine.....	43
3.2.3. Variables	44
3.2.4. Determinación del modelo cinético de lixiviación	44



3.2.5. Análisis de mineral oxidado de cobre (método del ácido perclórico).....	45
3.2.6. Lixiviación de cobre con reactivo glutamato monosódico (pruebas)	46
3.2.7. Cinética de lixiviación del cobre con reactivo glutamato monosódico ...	47
3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	48
3.3.1. Preparación del mineral	48
3.3.2. Preparación de solución lixivante	49
3.3.3. Ajuste de la alcalinidad de la solución lixivante.....	49
3.3.4. Tiempo de lixiviación	49
3.3.5. Condiciones de operación de prueba	50
3.3.6. Toma de datos experimentales	50
3.3.7. Análisis químico de muestras	51

CAPÍTULOS IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADO DEL ANÁLISIS DE MINERAL OXIDADO COBRE.....	52
4.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES LIXIVIADAS DE COBRE PRUEBA	52
4.3. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES DE COBRE.....	53
4.4. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES LIXIVIADAS DE COBRE PRUEBAS	54
4.5. CONDICIONES DE OPERACIÓN ÓPTIMA	54
4.6. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DE COBRE.....	55
4.7. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DE COBRE.....	56
4.8. MODELOS DEL NÚCLEO SIN REACCIONAR	58
4.8.1. Control por reacción química.....	58
4.8.2. Control por difusión	60



4.9. CONDICIONES DE OPERACIÓN OPTIMAS DE LOS OBJETIVOS.....	61
4.10. DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE.....	61
V. CONCLUSIONES.....	64
VI. RECOMENDACIONES.....	65
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXOS.....	70

Área : Procesos industriales.

Línea : Tecnologías ambientales y recursos naturales.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 06/11/2019



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especies minerales de cobre mineralización y composición	20
Tabla 2. Análisis granulométrico de la muestra.....	48
Tabla 3. Condiciones de operación prueba.	50
Tabla 4. Resultados de análisis de la muestra del mineral oxidado.....	52
Tabla 5. Resultados de las pruebas de lixiviación del mineral oxidado de cobre.....	52
Tabla 6. Porcentaje de extracción de cobre.	54
Tabla 7. Condiciones de operación óptima.....	55
Tabla 8. Resultados de la lixiviación de cobre a diferentes tiempos.	55
Tabla 9. Calculo de porcentaje de extracción de cobre.	56
Tabla 10. Porcentaje de extracción de cobre en determinados tiempos	57
Tabla 11. Control por reacción química	58
Tabla 12. Modelo de control por difusión.	60
Tabla 13. Parámetros óptimos.....	61
Tabla 14. Cuadro comparativo de extracción de cobre.....	63



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Glutamato monosódico	22
Figura 2. Estructura del glutamato monosódico	22
Figura 3. Sección de un yacimiento porfídico de cobre.	24
Figura 4. Esquema del modelo de conversión progresiva, Levenspiel, (2004).....	32
Figura 5. Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar Levenspiel, (2004)	33
Figura 6. Sección transversal de minerales lixiviados con ácido sulfúrico en distintos tiempos (A: 2 semanas, B: 4 semanas, C: 6 semanas) (Benner B., Roman R. 1974)	34
Figura 7. Esquema de las cinco etapas del mecanismo de lixiviación. (Guiachetti, D.A., 2011)	35
Figura 8. Modelos del núcleo sin reaccionar para el control difusional (Guiachetti, D.A., 2011)	36
Figura 9. Modelos del núcleo sin reaccionar para el control por reacción química. (Guiachetti, D.A., 2011)	40
Figura 10. Ubicación geográfica de los socavones del cerro Azoguine. (Elaboración propia).....	44
Figura 11. Porcentaje de extracción de cobre en función al tiempo.....	56
Figura 12. Modelo matemático.....	58
Figura 13. Control por reacción química.....	59
Figura 14. Control por difusión.	60



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

GMS	: Glutamato Monosódico.
LAS	: Laboratorios Analíticos del Sur.
UNA	: Universidad Nacional del Altiplano.
pH	: Potencial de Hidrogeno.
R/S	: Relación sólido líquido.
INACAL	: Instituto Nacional de Calidad.
ΔG	: Energía libre de gibbs.
FDA	: Administración de fármacos y alimentos.
GRAS	Generalmente reconocido como seguro.
SI	: Sistema internacional.



RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en el laboratorio de control de calidad de la facultad de ingeniería química de la Universidad Nacional del Altiplano del departamento de Puno, tiene por objetivo determinar la cinética de lixiviación de minerales óxidos de cobre empleando aminoácido glutamato monosódico. Con la metodología de toma de muestra del mineral oxidado de cobre, chancado, molienda, pulverizado, tamizado, hasta obtener una granulometría de malla fina -200 (80%) se preparó 1000mL de solución glutamato monosódico (45g/L), se ajustó el pH a 9,5 con CaO, se agregó 100g de mineral, se inició la lixiviación por agitación mecánica a 300rpm con agitación continua por 24horas durante el proceso de lixiviación se tomaron alícuotas de 20mL de solución lixiviada a diferentes tiempos 01; 03; 06; 08; 21 y 24 horas. En el proceso, se decantó por 10 minutos para la toma de alícuotas respectivamente. Se llevó a analizar las muestras en laboratorios analíticos del sur (absorción atómica). El porcentaje de extracción de cobre fue de 72,89 %, determinándose las variables óptimas como la concentración de reactivo glutamato monosódico 45g/L, pH 9,5 y tiempo de lixiviación 24horas, la relación solido (mineral) – líquido (solución) 1/10. La constante de velocidad de reacción fue $1,24 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. El glutamato monosódico disuelve el cobre contenido en minerales oxidados, mediante la lixiviación por agitación.

Palabras claves: Cinética, Cobre, lixiviación y glutamato monosódico.



ABSTRACT

The present research work was developed in the quality control laboratory of the faculty of chemical engineering of the National University of the Altiplano of the department of Puno, aims to determine the leaching kinetics of copper oxides minerals using amino acid monosodium glutamate. With the sampling methodology of the oxidized copper ore, crushed, ground, pulverized, screened, until obtaining a fine mesh granulometry -200 (80%), 1000mL of monosodium glutamate solution (45g / L) is prepared, it is adjusted to pH 9.5 with CaO, 100g of ore is added, leaching is initiated by mechanical stirring at 300rpm with continuous stirring for 24 hours during the leaching process 20mL aliquots of leaching solution are taken at different times 01; 03; 06; 08; 21 and 24 hours. In the process, he opts for 10 minutes to take aliquots respectively. The samples are analyzed in analytical laboratories in the south (atomic absorption). The percentage of copper extraction reached was 72.89%, determining the optimal variables such as the concentration of monosodium glutamate reagent 45g / L, pH 9.5 and 24 hour leaching time, the solid (mineral) - liquid (solution) ratio 1/10 The reaction rate constant was $1.24 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Monosodium glutamate dissolves the copper contained in oxidized minerals, by stirring leaching.

Keywords: Kinetics, Copper, leaching and monosodium glutamate.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La lixiviación es un proceso de la hidrometalurgia mediante el cual se extraen los metales de los minerales que contienen especies económicamente recuperables, a partir del siglo XX, la lixiviación de cobre se realizó principalmente con el uso de H_2SO_4 ; sin embargo, en los últimos años se ha venido experimentando investigaciones con bases orgánicas (Pérez F., 2016).

El proceso de lixiviación por agitación, se inicia en la etapa de chancado, molienda y pulverizado del mineral oxidado de cobre hasta un tamaño de malla -200, este mineral usualmente tiene alto contenido de cobre, seguidamente se lixivía con ácido sulfúrico aplicando agitación, finalmente pasa a una etapa de concentración por extracción de solvente y electrodeposición en láminas de cobre de alta pureza Pérez F., (2016).

La extracción de metales con el uso de ácidos concentrados, trae consecuencias negativas en la salud de la población, alterando el equilibrio ecológico y al medio ambiente. El ácido sulfúrico es el agente lixivante más usado en minerales oxidados de cobre; el cual es una sustancia corrosiva y altamente tóxica al contacto con los tejidos corporales en bajas concentraciones, la inhalación de sus vapores provoca tos aguda generando severo daño en los pulmones y en todo el tracto respiratorio.

Los minerales oxidados que contienen el cobre en el estado divalente, por ejemplo: azurita ($Cu_3(OH)_2CO_3$), malaquita ($Cu_2(OH)_2CO_3$), tenorita (CuO) y crisocola ($CuSiO_3 \cdot 2H_2O$), son completamente solubles ya sea en la lixiviación ácida o alcalina a temperatura de ambiente. Ata et al., 2001; Kuhn et al., 1974; Habashi et al., (1983).

En la lixiviación de metales se utiliza ácido sulfúrico concentrado, el cual es muy perjudicial para el medio ambiente. Cárdenas et al., (2017). Es por esta razón, en el



presente estudio se propone una nueva alternativa menos contaminante para lixiviación de minerales oxidados de cobre con glutamato monosódico

En el presente estudio se logró determinar los objetivos planteados de lixiviación del mineral oxidado de cobre mediante el uso de glutamato monosódico, a partir de una muestra con una ley de 3,72 % de cobre; la prueba del proceso de lixiviación se realizó en un medio básico a una agitación de 300 rpm y a temperatura ambiente, lográndose una extracción de 72,89% de cobre. Las muestras estudiadas se enviaron a laboratorios analíticos del sur de la ciudad de Arequipa.

La tecnología de lixiviación de cobre con ácido sulfúrico genera contaminación ambiental debido que el ácido disuelve la mayoría de los metales tóxicos que contiene los minerales oxidados. Frente a este problema ambiental se propone el uso de reactivo orgánico glutamato monosódico para la extracción de cobre por ser amigable al medio ambiente y fácil de manipulación. Hoy en día se busca una tecnología limpia para tratamiento de minerales de cobre.

La presencia de la minería genera fuentes de trabajo en los lugares más inhóspitas, además las regalías mineras representan desarrollo económico de los pueblos y comunidades de la Región de Puno.

Según la información de la Defensoría del Pueblo en su reporte N°72 de fecha 10/03/2010 indica que se registraron 252 conflictos sociales, de las cuales 121 relacionados a temas socio ambientales. defensoria.gob.pe, (2010).

El glutamato monosódico es un reactivo orgánico que forma complejos con el ion metálico cobre por lo que será utilizado como lixivante en la recuperación de cobre a partir de minerales oxidados de cobre. Los resultados de la investigación contribuirán en el desarrollo científico y tecnológico.



1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1. Objetivo general

- Evaluar la cinética de lixiviación de minerales oxidados de cobre con reactivo glutamato monosódico en medio alcalino.

1.1.2. Objetivo específico

- Determinar la concentración de glutamato monosódico en la cinética de lixiviación de cobre.
- Determinar el pH óptimo en el proceso de lixiviación de minerales óxidos de cobre.
- Determinar el tiempo de lixiviación de mineral oxidados de cobre.
- Determinar la constante de velocidad de reacción.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES SOBRE LA LIXIVIACIÓN

En su trabajo de “lixiviación de minerales oxidados de Cu con nitrato de amonio, en yacimiento minero socsan de pucará-puno” Los parámetros óptimos es 130 g/L de concentración de NH_4NO_3 , tiempo de 10h y a un pH de 10,05 con un 95,6% de extracción de cobre. Uchiri M., (2018)

La lixiviación de minerales oxidados de cobre en solución de Etilendiaminotetraacétato de sodio (EDTA) en un medio básico sobre el mineral oxidado de cobre. Al aumentar la concentración de EDTA de 0,1 a 0,2 molar, la temperatura de 20°C a 30°C y el tiempo de agitación de 120 minutos a 180 minutos la recuperación de cobre aumenta. También que la recuperación de iones cobre es más elevada en un medio básico, aumentando la recuperación de Cu hasta los 12,5 de pH reduciéndose para los 13,5 de pH. Bustamante A., (2016)

Cinética de lixiviación de mineral de manganeso en solución de ácido sulfúrico utilizando agente reductor mazorca de maíz y trigo. El porcentaje de extracción de manganeso obtenida fue de 97%, las condiciones de operación fueron: temperatura de reacción adecuada 80°C, concentración del ácido sulfúrico 1,9 M y 3 g de mazorca de trigo. El modelo cinético de la lixiviación de minerales de manganeso se ajusta al modelo del núcleo sin reaccionar expresado por la ecuación siguiente: $1-(1-XA)^{1/3} = Kt$. Argote R., (2017)

“Proceso Alternativo de Lixiviación para la Obtención de Soluciones Ricas en Cobre en la Minería Artesanal de la Región Arequipa”; los valores óptimos de las variables estudiadas, trabajándose con una concentración de nitrato de amonio 34, 35 g con tamaño de partícula hasta ½ pulgada de diámetro, relación sólido/líquido (Rs/L) 1/5,



se consideró a un nivel de $\text{pH} = 9,5$ y un tiempo de lixiviación de 6 días, así obteniendo un porcentaje de recuperación hasta del 65 % de cobre. Cárdenas et al., (2017)

El continuo agotamiento de los grandes depósitos de sulfuro de cobre de alta calidad que tradicionalmente son procesados por vía pirometalúrgica requiere enfoques hidrometalúrgicos innovadores en el procesamiento de minerales de baja ley. Ata et al., (2001)

Como material de estudio se empleó un mineral tipo crisocola proveniente del distrito de Salpo. Los agentes lixiviantes fueron soluciones acuosas de ácido sulfúrico y de ácido cítrico, cuyas concentraciones consideradas fueron 5, 10, 15 y 20 g/L. Se realizaron dos repeticiones para cada combinación agente lixiviante-concentración de agente lixiviante, sumando un total de 16 pruebas. Los resultados experimentales mostraron que la mayor extracción de cobre se obtiene con el ácido sulfúrico como agente lixiviante y cuando la concentración de agente lixiviante es 20 g/L 85.73 % Cu. Cordova J.A., Campos E., (2016)

El proceso de lixiviación fue llevado a cabo en dos etapas; primero se lixivió el mineral con solución de ácido sulfúrico para extraer cobre y hierro, llegando a recuperar el cobre al 85,21%, en este proceso se utilizó el diseño experimental (factorial 2^n). En la segunda etapa es tratado el mismo mineral libre de cobre y hierro, con sales oxidantes de nitrato de amonio y cloruro de sodio en presencia de ácido sulfúrico a $\text{pH} < 1$ para recuperar oro y plata; la reacción química de sales oxidantes con ácido sulfúrico se produce agua regia y cloro nascente, el cual disuelve al oro y plata, los resultados de recuperación alcanzan al 98 % en oro y 48 % en plata. En cuanto al diseño utilizó el diseño experimental Plackett- Burman, que es un método estadístico que ha permitido realizar el menor número de pruebas experimentales. G. Quille., (2009)

La lixiviación de mineral de malaquita en amoníaco acuoso carbonato de amonio a



25°C, relación sólido - líquido de 1:10, velocidad de agitación de 300 rpm, tamaño de partícula malla -100 recupera hasta el 98 % de cobre en 120 min, mientras que el mineral de la ganga no se disolvió en la solución. Bingol et al., (2005)

La glicina se utiliza en un ambiente oxidante y alcalino para lixiviar calcopirita a presión atmosférica y temperaturas ligeramente elevadas. También se investigaron los pasos del proceso para recuperar cobre y glicina a partir de soluciones acuosas alcalinas. La lixiviación del concentrado de flotación de calcopirita en soluciones de glicina se realizó a diferentes condiciones de lixiviación en un reactor de lixiviación de 1,25 L con una suspensión agitada y concentración controlada de oxígeno disuelto (OD). En presencia de aire, oxígeno o peróxido de hidrógeno o una mezcla de los mismos, la glicina puede disolver el cobre de la calcopirita a temperatura ambiente o elevada (40-60°C) y presión atmosférica. Eksteen J.J., (2017)

El proceso se inició con las operaciones de chancado y molienda del mineral hasta obtener una granulometría de malla fina 80% malla -200. La extracción de oro fue realizada por el método de lixiviación por agitación. El porcentaje de extracción de oro alcanzada fue de 93,98 %, determinándose las variables óptimas como la concentración de reactivo Sandioss 0,8%, pH 11 y tiempo de lixiviación 72 horas. La técnica de lixiviación con reactivo Sandioss se comparó con la técnica de cianuración con cianuro de sodio, los resultados de porcentaje de extracción de oro fueron iguales. El diseño experimental factorial 2n el mismo que ha permitido optimizar las variables del proceso. Según el diseño experimental se han realizado 8 pruebas y 3 pruebas centrales haciendo un total de 11 ensayos. Ccari N., (2018)

La calcosita natural (Cu_2S) se lixivió con solución de glicina en medio alcalino con presencia de oxígeno, la lixiviación fue muy rápida en las primeras 6 horas de lixiviación después de lo cual la lixiviación fue lenta, la extracción alcanzada es de 78% de cobre.



Tanda B.C. et al., (2018)

Se ha demostrado que las soluciones alcalinas de glicina /glicinato tienen un potencial significativo en la lixiviación de oro y cobre de minerales, concentrados y desechos que contienen estos metales. Se intentó comprender el comportamiento de adsorción del complejo de glicinato de oro sobre carbón activado en presencia de cobre para un sistema de glicina/glicinato alcalino puro, después de que el oro se ha disuelto usando peróxido de hidrógeno como oxidante y soda cáustica como modificador de pH.

Tauetsile P.J. et al., (2018)

Se ha estudiado y evaluado un proceso de lixiviación selectiva alternativa para minerales de cobre a partir del concentrado gravimétrico de cobre y oro (3,75% de Cu, 11,6% de Fe, 11,4% de S y 0,213% de Au) usando soluciones de glicina alcalina. El sistema lixivante que contiene glicina y peróxido mostró que se obtuvo una disolución total de cobre del 98% en 48 h en condiciones ambientales y un pH de 10.5-11. Los resultados muestran que también se disolvieron 100% de calcosina, cuprita, cobre metálico y aproximadamente 80% de calcopirita en concentrado de cobre. E.A.Oraby y J.J.Eksteen (2014)

A continuación, se muestra en la tabla 1, las principales especies mineralógicas de cobre, tanto sulfurada como oxidada.

Tabla 1. *Especies minerales de cobre mineralización y composición*

MINERALIZACIÓN	ESPECIE MINERALÓGICA	FORMULA QUÍMICA MÁS FRECUENTE	Cu (%)
Óxidos de cobre	Cuprita	Cu_2O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Atacamita	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	59,5
	Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	57,5
	Brochantita	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	56,2
	Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	55,3
	Antlerita	$\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	53,7
	Delafosita	FeCuO_2	42,0
	Dioptasa	$\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$	40,3
	Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	36,2
	Chalcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25 ,5
	Cobre nativo	Cu^0	100,0
	Limonita(pitch)	$(\text{Fe}_i\text{-Cu}_j)\text{O}_2$	variable
	Copper wad	CuMnO_2Fe	variable
	Copper pitch	$\text{CuMn}_8\text{FeSiO}_2$	variable
Cobre secundario	Calcosina	Cu_2S	79,9
	Digenita	Cu_9S_5	78,1
	Covelina	CuS	66,5
	Cobre nativo	Cu^0	100,0
Cobre primario	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3
	Tenantita	$\text{Cu}_{12}\text{AsS}_4$	51,6
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4
	Tetraedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	45,8
	Calcopirita	CuFeS_2	34,6

Fuente: Domic E. 2001.



2.1.1. Propiedades y usos del cobre

El cobre tiene excelentes propiedades mecánicas y es el segundo mejor conductor después de la plata a la que aventaja por su bajo precio. Tiene buena resistencia a la corrosión y extraordinaria ductilidad lo que permite transformarlo en alambres de hasta 0,025 mm. Se utiliza en cables y líneas de alta tensión exteriores, en el cableado eléctrico de interiores, enchufes y maquinaria eléctrica en general, generadores, motores, reguladores, equipos de señalización, aparatos electromagnéticos y sistemas de comunicaciones. Es también el mejor conductor del calor lo que explica su uso en situaciones en las que se desee calentar o enfriar rápidamente como refrigerantes, intercambiadores de calor, pailas, utensilios de cocina, etc. No tiene propiedades magnéticas lo que permite su uso en construcción eléctrica, electrónica, armamentos, relojería, etc. Al ser un metal resistente a las condiciones ambientales se utiliza en techos, grandes esculturas, cúpulas. El cobre ayuda a la formación de la hemoglobina por lo que debe ser ingerido diariamente en muy pequeñas cantidades. Sus compuestos derivados tienen efecto bactericida y evitan la proliferación de algas, es por eso que se agregan a las piscinas y estanques (sulfato de cobre) y se utilizan en agricultura. Surco, M., (2012)

2.2. GLUTAMATO MONOSÓDICO

El glutamato de sodio, también conocido como glutamato monosódico (GMS, MSG en inglés) es la sal sódica del ácido glutámico, uno de los aminoácidos no esenciales más abundantes en la naturaleza. Ninomiya K., (1998)

La Administración de Fármacos y Alimentos (FDA) de Estados Unidos clasificó al GMS como Generalmente Reconocido como Seguro (GRAS, por sus siglas en inglés) y la Unión Europea, como un aditivo alimentario. El GMS tiene el código HS 29224220 y el Número E E621. Current EU approved additives and their E Numbers. El glutamato que forma parte del GMS aporta el mismo sabor umami que el glutamato presente en

otros alimentos. Ambos son químicamente idénticos. (Ikeda K., 2002)

La industria alimentaria comercializa y usa el GMS como potenciador del sabor debido a que equilibria y resalta el carácter de otros sabores. Loliger J., (2000)



Figura 1. Glutamato monosódico

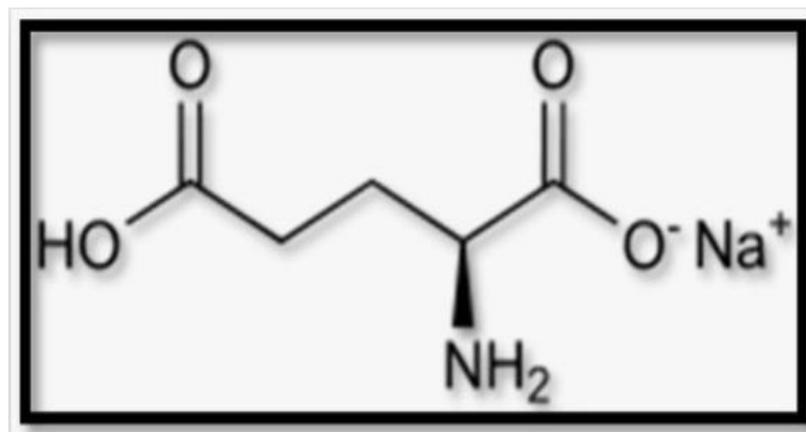


Figura 2. Estructura del glutamato monosódico

2.2.1. Propiedades físicas y químicas

Apariencia: Gris o blanco sucio

Densidad: $2,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $2,1 \text{ g/cm}^3$

Masa molar: 169.11 g/mol

Solubilidad en agua: Muy soluble en agua

Riesgos

Ingestión: Puede causar irritación, náusea, vómitos y diarrea.

Inhalación: Irritación; la exposición a largo plazo puede resultar fatal.



Piel: Bajo riesgo.

Ojos: Bajo riesgo.

Nota: valores en el SI (sistema internacional) y en condiciones (25°C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario.

2.3. GEOLÓGICA DEL YACIMIENTO DE COBRE

Los depósitos de minerales de cobre pueden ser sedimentarios, estratiformes o porfídicos. Bartlett R., (1998)

En un depósito porfídico, los minerales de cobre se encuentran diseminados en finos granos en las rocas. De acuerdo a la geología los principales yacimientos de cobre se clasifican como estratiformes, de sulfuros masivos y porfídicos. Los yacimientos porfídicos son lo más importantes, ya que constituyen la principal fuente de extracción de cobre debido a su gran volumen, la explotación puede resultar económicamente atractiva aun en concentraciones de cobre cercanas al 0,4%. Bartlett, R., (1998)

El típico yacimiento porfídico de cobre en su estado original de formación contiene mineralización primaria de calcopirita (CuFeS_2) y de pirita (FeS_2). Por millones de años, estos yacimientos primarios, pasan por una intensa transformación producida por fenómenos de óxido reducción. Entre estos fenómenos pueden nombrarse aquellos de oxidación hidrotermal, meteorización y oxidación directa con oxígeno y agua. Domic E., (2004)

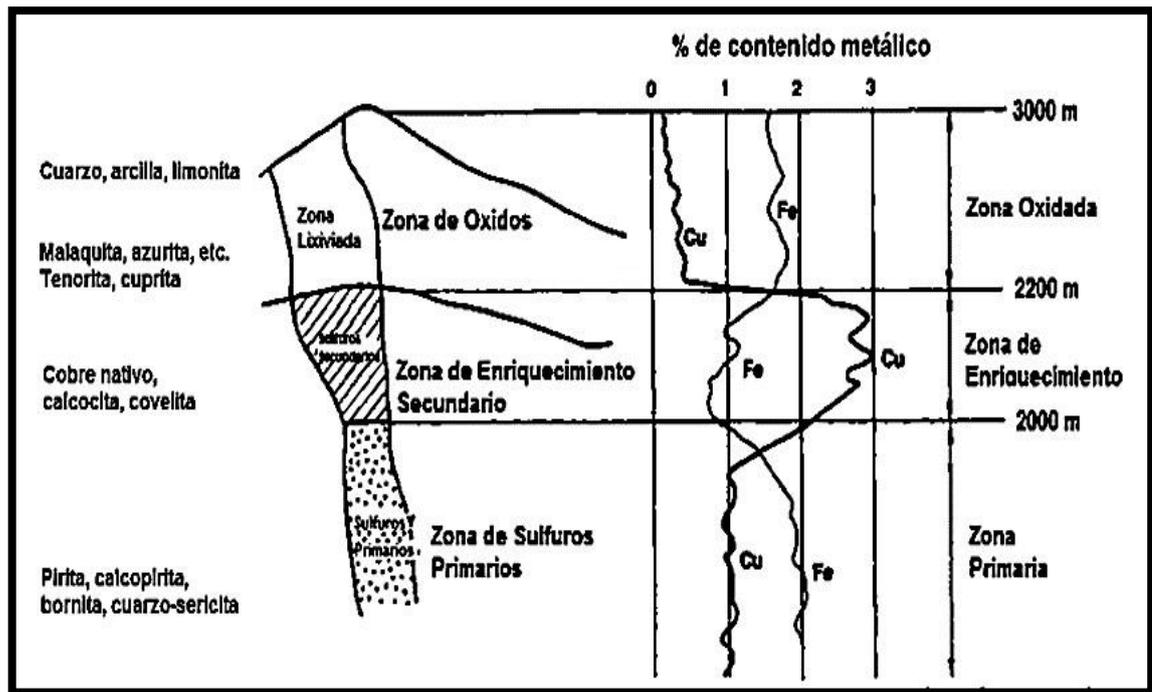


Figura 3. Sección de un yacimiento porfídico de cobre.

Fuente: geología de los yacimientos de cobre (Bartlett, 1998).

Un yacimiento porfídico de cobre, en su estado original de formación corresponde a un cuerpo intrusivo que contiene mineralización primaria finamente diseminada de calcopirita y de pirita, el cual es sometido a la acción de los niveles de agua superficial cargada con oxígeno por su cercanía al ambiente atmosférico, las sales que en ella se disuelven y la acción catalítica de las bacterias. En dichas condiciones se produce una oxidación, disolución y transporte del cobre, hierro y otros elementos de importancia. Bartlett., (1998)

Este transporte de soluciones mineralizadas a través de la roca, da lugar a reacciones de formación de nuevas especies minerales (sulfuros secundarios), que pueden llegar a acumularse en cantidades económicamente importantes formando lo que se conoce como una zona de “enriquecimiento secundario”. Una oxidación posterior de esta zona de enriquecimiento, puede conducir a la formación de los llamados minerales oxidados. En algunos casos la erosión juega un papel importante, y es posible que algunas



de dichas zonas no estén presentes o que existan zonas de composición mixta (Domic Mihovilovic, 2004). Cuando se encuentra menas secundarias (malaquita, azurita), depósitos de cobre sobre la superficie, saben que les conducirán a grandes concentraciones de cobre en las profundidades. Domic Mihovilovic., (2004)

2.4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN UNA LIXIVIACIÓN

2.4.1. Tiempo de lixiviación

La economía del proceso de lixiviación es función del porcentaje de extracción del cobre. Sin embargo, esto es tan importante como el tiempo necesario para una extracción aceptable, es decir la velocidad de disolución. Por lo tanto, la cinética de lixiviación del mineral va a determinar el tiempo de residencia óptimo en la pila con el objeto de hacer la operación económicamente rentable. Por otro lado, se debe tomar en cuenta que un proceso rápido no es un objetivo económico en sí mismo, pero sí lo son una recuperación elevada y un bajo consumo de ácido. Guiachetti D., (2014)

2.4.2. pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O]^+$ presentes en determinadas disoluciones.

La sigla significa potencial hidrógeno, o potencial de hidrogeniones (pondus hydrogeni o potentia hydrogeni). Este término fue acuñado por el químico danés S. P. L. Sorensen (1868-1939), quien lo definió en 1909 como el opuesto del logaritmo en base 10 (o el logaritmo del inverso) de la actividad de los iones hidrógeno. Esto es:

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

Desde entonces, el término "pH" se ha utilizado universalmente por lo práctico que resulta para evitar el manejo de cifras largas y complejas. En disoluciones diluidas, en lugar de utilizar la actividad del ion hidrógeno, se le puede aproximar empleando la concentración molar del ion hidrógeno.



Por ejemplo, una concentración de $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-7} \text{ M}$ (0,0000001) es simplemente un pH de 7, ya que $\text{pH} = -\log [10^{-7}] = 7$

En disolución acuosa, la escala de pH varía, típicamente, de 0 a 14. Son ácidas las disoluciones con pH menores que 7 (el valor del exponente de la concentración es mayor, porque hay más iones en la disolución) y alcalinas las de pH superiores a 7. Si el disolvente es agua, el $\text{pH} = 7$ indica neutralidad de la disolución. Bustamante A., (2016)

2.4.3. Granulometría

La cinética de lixiviación de una partícula se mejora cuando el mineral es más fino, pero otras consideraciones a nivel macroscópico como la permeabilidad y la aireación son favorecidas cuando la molienda es más gruesa. El tamaño óptimo tendrá un compromiso entre estos factores y el costo de la molienda. Millrt G., Newton T., (1999)

2.4.4. Altura de la pila

Existe un comportamiento entre el tiempo de la lixiviación, el cual se reduce cuando la altura es menor, y los costos de apilamiento e irrigación, que son mayores cuando se tienen lechos bajos. La decisión se hace mucho más crítica en minerales sulfurados, cuando la aireación disminuye con la profundidad del lecho, afectando la recuperación de cobre. Millrt G., Newton T., (1999)

2.4.5. Taza de riego

La lixiviación está condicionada cinéticamente por la tasa de riego necesaria para suministrar las soluciones que activan la físico-química del proceso. Esta tasa óptima necesariamente debe cumplir simultáneamente con el aporte del ácido necesario para obtener concentraciones de cobre e impurezas pre-establecidas como objetivo para la solución rica y con la definición previa de una recuperación objetivo factible de obtener bajo criterios económicos además, son importantes las consideraciones operacionales relacionadas con apozamientos, canalizaciones y derrumbes de pilas, las cuales



repercuten negativamente sobre la recuperación, y que dependen de esta variable. Millrt G., Newton T., (1999)

2.4.6. Concentración de ácido en la solución de riego

La acidez de las soluciones lixiviantes es una de las fuerzas impulsoras más importantes en la lixiviación. El ácido no solo interacciona con las especies que contienen cobre, sino que también con especies reactivas de la ganga. Por lo tanto, si se trabaja con una concentración de ácido inferior a la óptima, se estará comprometiendo la recuperación de cobre, mientras que, si se opera con una concentración mayor a la óptima, pese a recuperar la cantidad deseada de cobre, se dispara el consumo de ácido neto, ya que se liberaran contaminantes provenientes de la ganga. En consecuencia, es conveniente encontrar la relación entre la acidez que impulsa la cinética de la recuperación de cobre y que, al mismo tiempo, no favorezca la disolución de impurezas. Guiachetti D., (2014)

2.5. CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN

La cinética de lixiviación de los minerales es la determinación de las velocidades y mecanismos de disolución o extracción de los metales de interés económico. La cinética química es la rama de la fisicoquímica encargada de estudiar qué tan rápido se efectúa una transformación química. Etimológicamente, cinética viene del griego “kine” que significa movimiento e “ico”, que significa “relativo a”. El hecho de que una reacción sea termodinámicamente posible ($\Delta G < 0$), no es suficiente para predecir si el tiempo de reacción química está en el orden de horas o años, esto depende de la cinética química de la reacción. Este factor es muy importante para la concepción y la evaluación de la rentabilidad económica de todos los procesos hidrometalúrgicos. También en las plantas en operación, optimizar la cinética implica generalmente un mejoramiento del proceso. De esta forma, los productos finales de una operación hidrometalúrgica van a estar condicionados generalmente por condiciones de tipo cinético. Por ejemplo, la lixiviación



de la calcopirita (CuFeS_2) y otros sulfuros con sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ es termodinámicamente factible. Pero en la práctica, después de 100 días de lixiviación, sólo se alcanza a poner en solución un 5 % de la calcopirita (CuFeS_2), 50 % de calcosina (Cu_2S) y 80% de covelina (CuS). Veamos a continuación algunas definiciones para comprender la cinética de la lixiviación. Levenspiel O., (2004)

Orden de reacción

El orden de reacción con respecto a una especie en particular, es el valor numérico de la potencia a la cual la concentración es elevada, por lo tanto, describe la relación experimental entre la velocidad de reacción y la concentración de dicha especie. El orden total de una reacción es la suma de los exponentes, es decir si:

$$-\frac{dCA}{dt} = K C_A^\alpha C_B^\beta C_C^\gamma$$

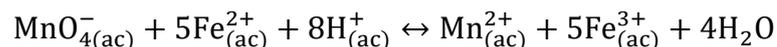
Entonces el orden total es $\alpha + \beta + \gamma$.

El orden de una reacción está esencialmente determinado por la correspondencia o ajuste óptimo entre una ecuación de velocidad y los datos experimentales. Se desprende de lo anterior, que no existe necesariamente una conexión entre el orden cinético y la estequiometría de una reacción.

2.5.1. Definiciones

- **Reacción homogénea:**

Reacciones químicas u electroquímicas en la cual todos los productos y reactantes pertenecen a una fase.



- **Reacción heterogénea:**

Reacciones químicas u electroquímicas en la cual los productos o reactantes pertenecen a más de 2 fases.





- **Velocidad de reacción:**

La velocidad de una reacción (v) es el número de moles transformados por unidad de tiempo del componente “i” involucrado en la reacción química. La velocidad de reacción se puede definir de varias formas:

Basado en la unidad de volumen de fluido reaccionante:

$$v_i = \left(\frac{1}{V}\right) \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de "i" formados}}{(\text{unidad de volumen de fluido}) \times (\text{tiempo})}$$

Basado en la unidad de volumen de reactor:

$$v_i = \left(\frac{1}{V_r}\right) \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de "i" formados}}{(\text{unidad de volumen de reactor}) \times (\text{tiempo})}$$

Basada en la unidad de superficie interfacial en un sistema de dos fluidos o basada en la unidad de superficie del sólido en los sistemas líquido-sólido (reacción heterogénea):

$$v_i = \left(\frac{1}{S}\right) \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de "i" formados}}{(\text{unidad de superficie}) \times (\text{tiempo})}$$

Basada en la unidad de masa del sólido en los sistemas fluido-sólido:

$$v_i = \left(\frac{1}{W}\right) \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de "i" formados}}{(\text{unidad de masa del solido}) \times (\text{tiempo})}$$

2.5.2. Cinética de disolución de óxidos de cobre

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

El estudio de la cinética entrega información vital desde el punto de vista práctico y conceptual ya que por un lado, los estudios cinéticos proporcionan datos de ingeniería valiosos para el diseño y la evaluación de proyectos mineros, por el otro, permiten determinar las condiciones de operación y los mecanismos y etapas limitantes involucradas, además de predecir la velocidad de extracción del cobres en diversas

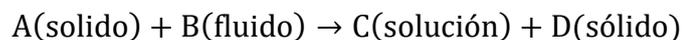


condiciones de temperatura, concentración de los agentes lixiviantes y oxidantes. Miller g., Newton T., (1999)

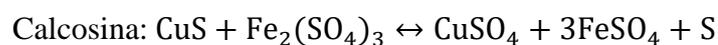
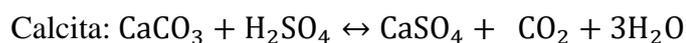
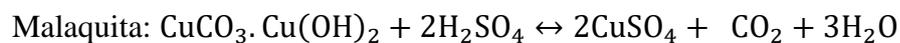
Como es sabido, los minerales de cobre oxidados se lixivian rápidamente en ácido cuando son comparados con otros minerales de cobre, mientras que los sulfuros secundarios requieren de oxidación y se lixivian lentamente. No obstante, los sulfuros secundarios de cobre se oxidan y disuelven más rápidamente que la calcopirita, razón por la cual son a veces llamados “sulfuros lixiviables”.

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

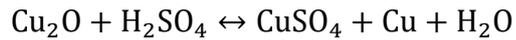
La reacción general que describe la lixiviación es:



Y algunos ejemplos específicos de óxidos de cobre, sulfuros y especies de la ganga. (Butt A., 1970)



Caso particular es el de la Cuprita, en la que solo la mitad del cobre se disuelve con ácido sulfúrico según la siguiente reacción. Butt A., (1970)

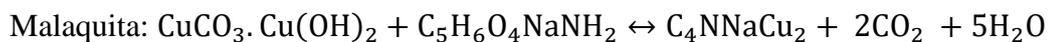


Mientras que el cobre elemental residual debe ser disuelto con la ayuda de un agente oxidante como, por ejemplo, el sulfato férrico:

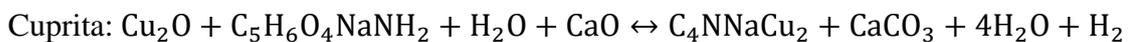


2.5.2.1. Mecanismo de reacción con glutamato monosódico

Algunos ejemplos específicos de óxidos de cobre, sulfuros.



Reacción principal



2.5.3. Modelos cinéticos de la lixiviación

Existen dos modelos que permiten representar la lixiviación de un mineral, en la que un líquido (reactivo) se pone en contacto con un sólido (mineral), reacciona con el y lo transforma en producto. Se debe tener muy presente que cualquier modelo o esquema conceptual que represente la evolución en el tiempo de una reacción le corresponde una representación matemática, esto es, su ecuación cinética. Por lo tanto, si se elige un modelo se debe aceptar en consecuencia su ecuación cinética y viceversa. Se puede decir entonces, que aquel modelo que represente mejor el comportamiento real de un proceso, su expresión cinética predecirá y describirá la cinética del proceso real. Asimismo, si el modelo elegido no ajusta o difiere mucho del comportamiento real del proceso, entonces su ecuación cinética resultará inútil. En resumen, las condiciones que deberían reunir un

modelo cinético son: que represente de la mejor manera posible el comportamiento del proceso real y que posea una expresión matemática simple y fácil de manejar. Un modelo podría depender de un sinnúmero de variables que lo hagan acercarse de mejor forma a lo que ocurre en la realidad, pero resultaría complicado su empleo desde el punto de vista matemático y de la disponibilidad de datos que se requiere. Levenspiel O., (1986)

2.5.4. Modelo de conversión progresiva

En este modelo se considera que el reactivo entra y reacciona a través de toda la partícula sólida en todo instante, lo que origina diferentes velocidades de reacción en los distintos lugares de ésta. De esta forma, las especies mineralógicas presentes en el sólido reaccionan continuamente y progresivamente en toda la partícula. Levenspiel O., (1986)

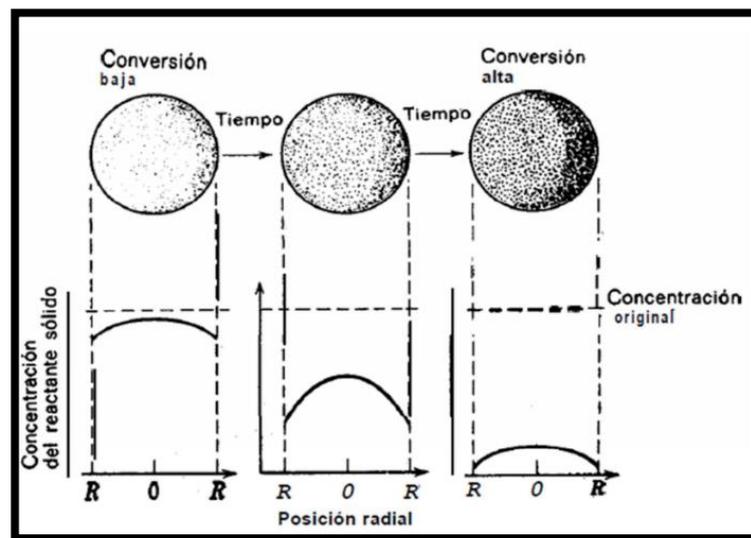


Figura 4. Esquema del modelo de conversión progresiva, Levenspiel, (2004)

2.5.5. Modelo del núcleo sin reaccionar (N.S.R.)

En este modelo, se considera que la reacción ocurre primero en la superficie externa de la partícula, formándose una zona superficial de reacción, que se mueve hacia el interior del sólido. Una vez que la reacción avanza, existirá en cualquier instante una zona reaccionada porosa de material completamente convertido (que comúnmente se denomina capa de ceniza) y una zona interna de material no reaccionado, que se reduce

de tamaño a medida que avanza la lixiviación del mineral. (Levenspiel O., 1986)

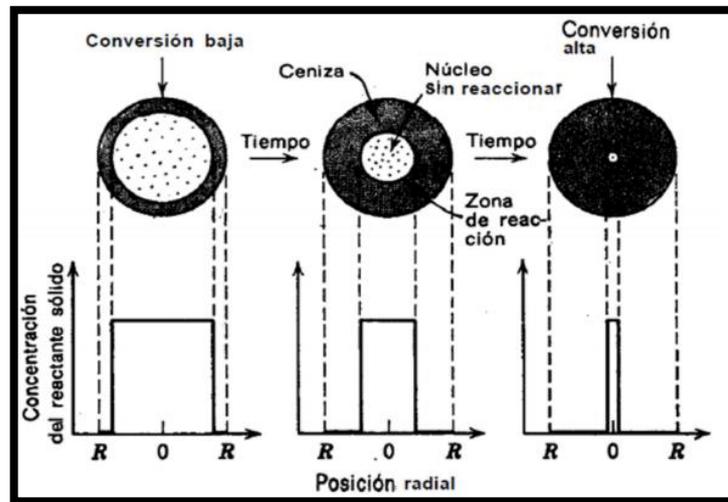


Figura 5. Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar Levenspiel, (2004)

2.5.6. Comparación entre modelos y operación real

Se ha encontrado que para minerales que presentan mineralización relativamente homogénea a través de la ganga, el modelo que mejor permite cuantificar el comportamiento real es el modelo del núcleo sin reaccionar. Esto se ve reflejado en un elevado número de casos experimentales en que al cortar y examinar la sección transversal de las partículas se puede observar una capa de material sólido que no ha reaccionado, rodeada de una capa de ceniza. Sin duda, puede que el contorno de la superficie sin reaccionar no esté perfectamente definido como lo indica el modelo, pero en general para este tipo de minerales, el mayor número de las veces, el modelo del núcleo sin reaccionar se ajusta mejor que el modelo de conversión progresiva. (Benner B., Roman R., 1974)

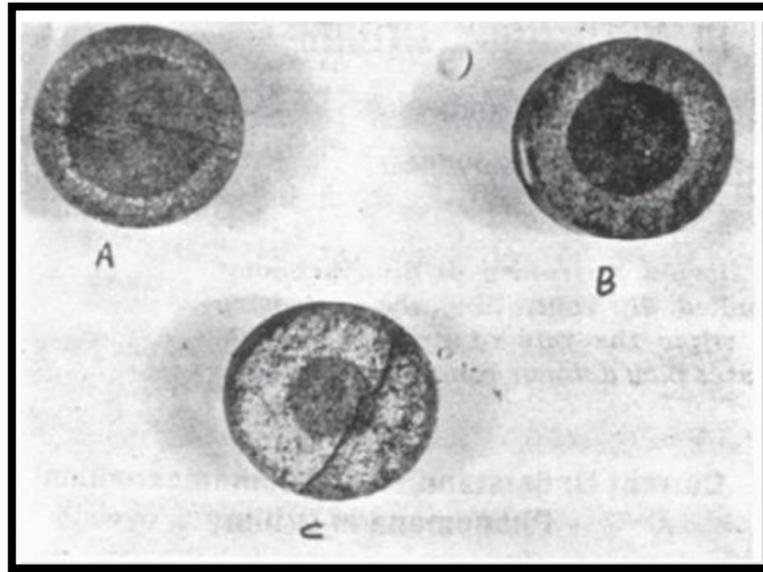


Figura 6. Sección transversal de minerales lixiviados con ácido sulfúrico en distintos tiempos

(A: 2 semanas, B: 4 semanas, C: 6 semanas) Benner B., Roman R. (1974)

2.6. MODELO DEL NÚCLEO SIN REACCIONAR PARA PARTÍCULAS ESFÉRICAS DE TAMAÑO CONSTANTE

En el modelo original, se considera que durante la reacción ocurren las cinco etapas siguientes. Levenspiel O., (1986) que también pueden observarse en la Figura:

Etapa 1: Reactivo lixivante (H^+ , Fe^{+3}) difunde a través de capa límite hasta la superficie de la partícula.

Etapa 2: Reactivo lixivante difunde en el interior de la partícula hacia la zona de reacción.

Etapa 3: Ocurre la reacción química, se forman productos de la reacción.

Etapa 4: Productos solubles de la reacción (Cu^{+2} , Fe^{+2}) difunden en el interior de la partícula hacia la superficie de ésta.

Etapa 5: Productos solubles difunden a través de la capa límite hacia el seno de la solución.

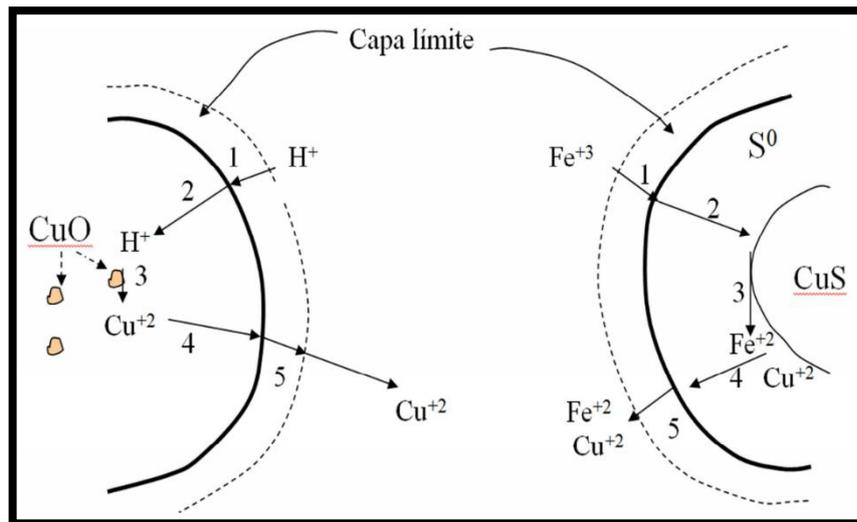


Figura 7. Esquema de las cinco etapas del mecanismo de lixiviación. (Guiachetti, D.A., 2011)

Para minerales de cobre que presentan una mineralización relativamente homogénea a través de la ganga es posible aplicar el modelo del núcleo sin reaccionar, considerando las etapas de difusión a través de la ceniza o ganga y de reacción en la superficie de las partículas de las especies mineralógicas presentes en el mineral. Dado que los minerales de cobre y de la ganga contienen distintas especies mineralógicas, las cuales tienen cinéticas diferentes, la etapa limitante durante la lixiviación puede ser la reacción o la difusión al interior de la partícula, o en ciertos casos ambas.

En términos de las resistencias individuales, correspondientes a las etapas de difusión a través de la capa de ceniza y reacción en la superficie del sólido, el modelo del núcleo sin reaccionar queda expresado por la siguiente ecuación cinética

$$-\frac{1}{4 \cdot r_0^2 \cdot \pi} \frac{dN_A}{dt} = \frac{\sigma \cdot C_B}{\frac{r_0 \cdot (r_0 - r_c)}{r_c \cdot D_{eff}} + \frac{r_0^2}{r_c^2 \cdot k}} \quad \text{Ec. 2,1}$$

Puede apreciarse en la Ecuación 2,1 la importancia relativa de las resistencias de las distintas etapas consideradas. Estas resistencias son muy diferentes, de ahí que la etapa que presente mayor resistencia será la etapa que controle la velocidad de reacción.

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. Levenspiel O., (1986)

2.6.1. Control difusional

El esquema de este mecanismo se muestra en la figura 8:

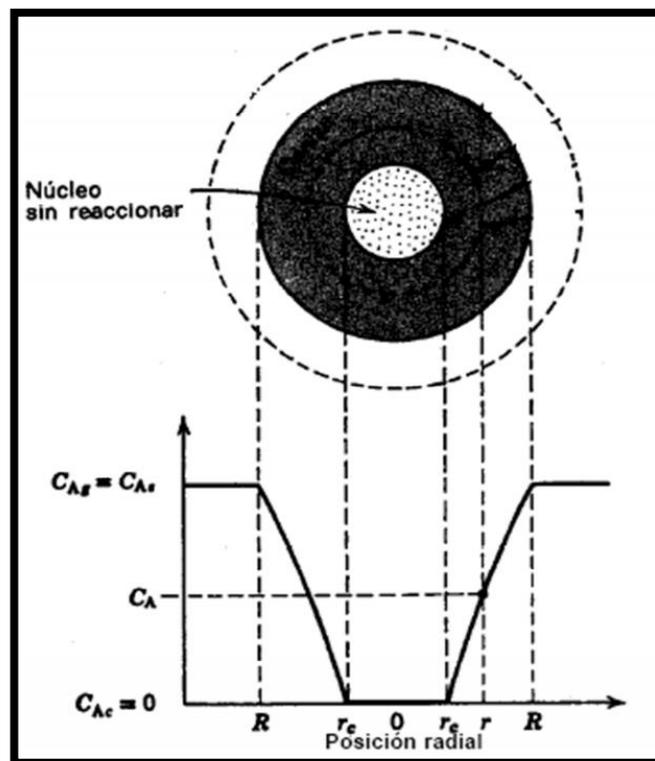


Figura 8. Modelos del núcleo sin reaccionar para el control difusional. Guiachetti, D.A., (2011)

Para deducir una expresión entre el radio del núcleo sin reaccionar y el tiempo de lixiviación, se efectúa un análisis en dos etapas. Levenspiel O., (1986) a) se considera una partícula que ha reaccionado parcialmente, escribiendo las ecuaciones para el flujo de reactivo; b) se aplica la relación encontrada en (a) para todos los valores de r_c , es decir, se integra entre r_0 , valor inicial de r_c y 0, valor final de r_c .

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:

$$-\frac{dN_B}{dt} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot Q_B \quad \text{Ec. 2,2}$$

Aplicando la ley de Fick

$$Q_B = D_{eff} \cdot \frac{dC_B}{dr} \Big|_{r=r} \quad \text{Ec. 2,3}$$

Combinando Ecuaciones 2.2 y 2.3 se tiene:

$$-\frac{dN_B}{dt} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{dC_B}{dr} \Big|_{r=r} \quad \text{Ec. 2,4}$$

Pero como el radio del núcleo sin reaccionar varía muy lentamente en relación a la velocidad de desplazamiento de B hacia la zona de reacción, se alcanza un estado pseudo-estacionario en el cual el flujo de B es constante. Luego se puede integrar a lo ancho de la zona reaccionada, desde r_0 a r_c :

$$-\frac{dN_B}{dt} \cdot \int_{r_0}^{r_c} \frac{dr}{r^2} = 4 \cdot \pi \cdot D_{eff} \cdot \int_{C_{B_s}=C_B}^{C_{B_c}=0} dC_B \quad \text{Ec. 2,5}$$

Se obtiene:

$$-\frac{dN_B}{dt} \cdot \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0} \right] = 4 \cdot \pi \cdot D_{eff} \cdot C_B \quad \rightarrow \quad -\frac{dN_B}{dt} = \frac{4 \cdot \pi \cdot D_{eff} \cdot C_B}{\left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0} \right]} \quad \text{Ec. 2,6}$$

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.

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 se vio que flujo de B 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 B para llegar a reaccionar será mayor, lo que ocasiona una disminución de la velocidad de difusión de B.



Para resolver en el tiempo es necesario relacionar primero la velocidad de consumo de B con la variación del radio r_c . Si la partícula de mineral tiene un volumen V (m^3) y la densidad molar de a (la especie mineral que se lixivia) en esa partícula es ρ_A ($\frac{\text{moles}}{m^3}$), entonces el número total de moles en la partícula es:

$$N_A = \rho_A \cdot V \quad \text{Ec. 2,7}$$

Cuando se consume n dN_B moles de B se cumple que:

$$-\sigma \cdot dN_B = -N_A = -\rho_A \cdot dV = -\rho_A \cdot d\left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^3\right) = -4 \cdot \pi \cdot \rho_A \cdot r_c^2 \cdot dr_c \quad \text{Ec. 2,8}$$

Por tanto, la variación del tamaño del núcleo asociada al consumo de reactivo dN_B está dada por:

$$-\sigma \cdot dN_B = -4 \cdot \pi \cdot \rho_A \cdot r_c^2 \cdot dr_c \quad \text{Ec. 2,9}$$

Reemplazando:

$$-\rho_A \cdot \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0}\right) \cdot r_c^2 \cdot dr_c = \sigma \cdot D_{eff} \cdot C_B \cdot dt \quad \text{Ec. 2,10}$$

Integrando:

$$-\rho_A \cdot \int_{r_c=r_0}^{r_c} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r_0}\right) \cdot r_c^2 \cdot dr_c = b \cdot D_{eff} \cdot C_B \cdot \int_0^t dt \quad \text{Ec. 2,11}$$

Lo que da finalmente

$$t = \frac{\rho_A \cdot r_0^2}{6 \cdot b \cdot D_{eff} \cdot C_B} \cdot \left[1 - 3 \cdot \left(\frac{r_c}{r_0}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{r_c}{r_0}\right)^3\right] \quad \text{Ec. 2,12}$$



La razón $\frac{r_c}{r_0}$ se puede relacionar con el grado de conversión X_A , o sea la fracción de A

que ha sido lixiviada, mediante la expresión:

$$1 - X_A = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^3 (\text{volumne núcleo sin reaccionar})}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 (\text{volumen total partícula})} = \left(\frac{r_c}{r_0}\right)^3 \quad \text{Ec. 2,13}$$

Luego, reemplazando en la ecuación 2.13:

$$t = \frac{\rho_A \cdot r_0^2}{6 \cdot \sigma \cdot C_B} \cdot [1 - 3 \cdot (1 - X_A)^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot (1 - X_A)] \quad \text{Ec. 2,14}$$

Si τ_D es el tiempo necesario para lixiviar todo el A presente, o sea para que $X_A = 1$, de la Ecuación 2.14 se obtiene que:

$$\tau_D = \frac{\rho_A \cdot r_0^2}{6 \cdot \sigma \cdot D_{eff} \cdot C_B} \quad \text{Ec. 2,15}$$

Utilizando las ecuaciones 2,14 y 2,15

$$\frac{t}{\tau_D} = [1 - 3 \cdot (1 - X_A)^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot (1 - X_A)] \quad \text{Ec. 2,16}$$

2.6.2. Control reacción química

La Figura representa una partícula cuando la etapa controlante es la Reacción Química:

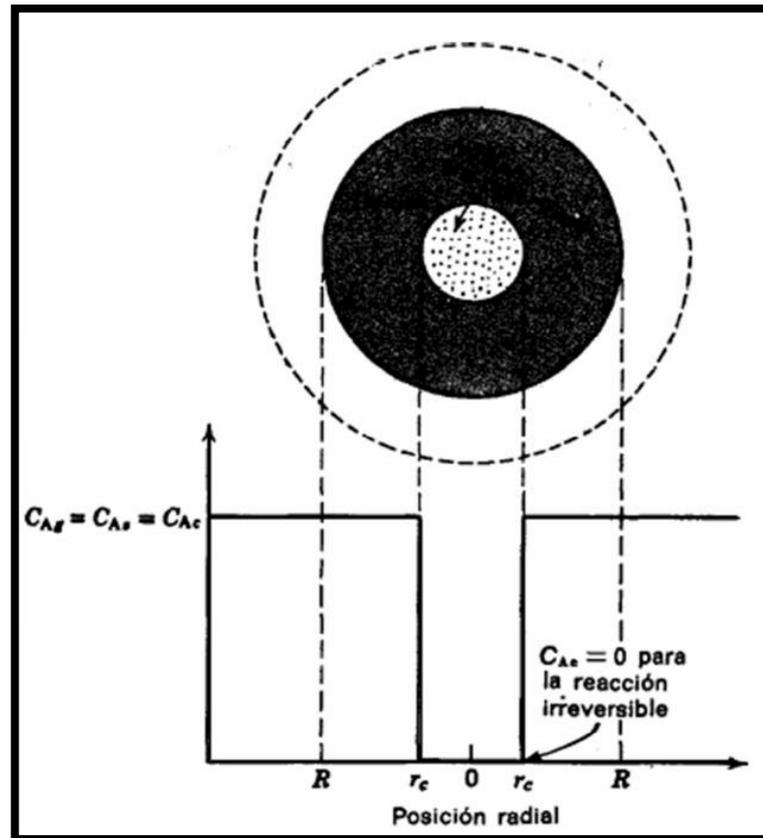


Figura 9. Modelos del núcleo sin reaccionar para el control por reacción química. Guiachetti, D.A., (2011)

En este caso la velocidad de reacción es proporcional al tamaño de la superficie del núcleo no reaccionado. Levenspiel O., (1986)

$$-\frac{dN_A}{dt} = -\sigma \cdot \frac{dN_B}{dt} = \sigma \cdot k \cdot C_B \cdot (4 \cdot \pi \cdot r_c^2) \quad \text{Ec. 2,17}$$

Expresando nuevamente N_A en base a la Ecuación 1.8:

$$-\sigma \cdot dN_B = -N_A = -\rho_A \cdot dV = -\rho_A \cdot d\left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^3\right) = -4 \cdot \pi \cdot \rho_A \cdot r_c^2 \cdot dr_c \quad \text{Ec. 2,18}$$

Utilizando las Ecuaciones 1.17 y 1.18; y dividiendo por el tiempo:

$$-\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r_c^2} \cdot \rho_A \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \frac{dr_c}{dt} = -\rho_A \frac{dr_c}{dt} = \sigma \cdot k \cdot C_B \quad \text{Ec. 2,19}$$



Integrando:

$$-\rho_A \cdot \int_{r_0}^{r_c} dr_c = \sigma \cdot k \cdot C_B \cdot \int_0^t dt \quad \rightarrow \quad t = \frac{\rho_A}{\sigma \cdot k \cdot C_B} \cdot (r_0 - r_c) \quad \text{Ec. 2,20}$$

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

$$\tau_R = \frac{\rho_A \cdot r_0}{\sigma \cdot k \cdot C_B} \quad \text{Ec. 2,21}$$

Incorporando la expresión de τ_R en la Ecuación 2.20 y reordenando se tiene:

$$\frac{t}{\tau_R} = 1 - \frac{r_c}{r_0} \quad \text{Ec. 2,22}$$

Finalmente, reemplazando $\frac{r_c}{r_0}$ de la Ecuación 2.13, se llega a:

$$\frac{t}{\tau_R} = 1 - (1 - X_A)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 2,23}$$

2.6.3. Control mixto

En el caso de que ninguna de las dos etapas anteriores controle por sí sola las cinéticas de lixiviación, se pueden sumar las resistencias debido a que actúan en serie Levenspiel O. y son lineales con respecto a la concentración, como se muestra en las Ecuaciones 2.6 y 2.17, de manera que:

$$\tau_{total} = \tau_D + \tau_R \quad \text{Ec. 2,24}$$

Por tanto, la expresión general sería:

$$t = \tau_R \cdot [1 - (1 - X_A)^{\frac{1}{3}}] + \tau_D \cdot [1 - 3 \cdot (1 - X_A)^{\frac{2}{3}} + 2 \cdot (1 - X_A)] \quad \text{Ec. 2,25}$$



CAPÍTULOS III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

Materiales

- Fiolas de 100mL.
- Probetas de 10 y 100mL.
- Vasos de precipitación de 10, 50, 100 y 250mL.
- Pipetas.
- Estufa.
- Termómetro.
- Embudo de vidrio.
- Papel filtro.
- Espátula.
- Cocinilla y malla de asbesto.

Reactivos

- Glutamato monosódico ($C_5H_6O_4NaNH_2$).
- Cal viva (CaO).
- Ácido clorhídrico concentrado (HCl).
- Agua destilada (H_2O).
- Acido perclórico ($HClO_4$).
- Carbonato de amonio ($(NH_4)_2CO_3$).
- Fluoruro de sodio (NaF).
- Yodato de potasio (KIO_3).
- Almidón.



Equipos

- Agitador mecánico. CAT/M6.1
- Balanza Analítica. Mettler Toledo/AB204
- Potenciómetro. WATERPROOF TRIMETER (TDS/pH y Temp)
- Chancadora.
- Molino de bolas.
- Cuarteador.
- Tamiz.
- Pulverizador.

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Toma de muestra

La toma de muestra del mineral oxidado de cobre, se recolecto aleatoriamente desde un socavón del cerro azoguine puno. Se toma de 6 puntos del socavón mineral zona oxidada utilizando herramientas de pico, pala y sacos de cada punto se tomó 1,5Kg de mineral haciendo un total de 9Kg aproximadamente con ello nos aseguramos de tener una muestra representativa de mineral oxidado de cobre. El mineral de muestra tiene un tamaño aproximado de 1/2".

3.2.2. Ubicación de los socavones del Cerro Azoguine

Coordenadas geográficas:

Latitud: 15°50'07,4"S

Longitud: 70°02'03,0"W

Coordenadas: -15,835379; -70,033953

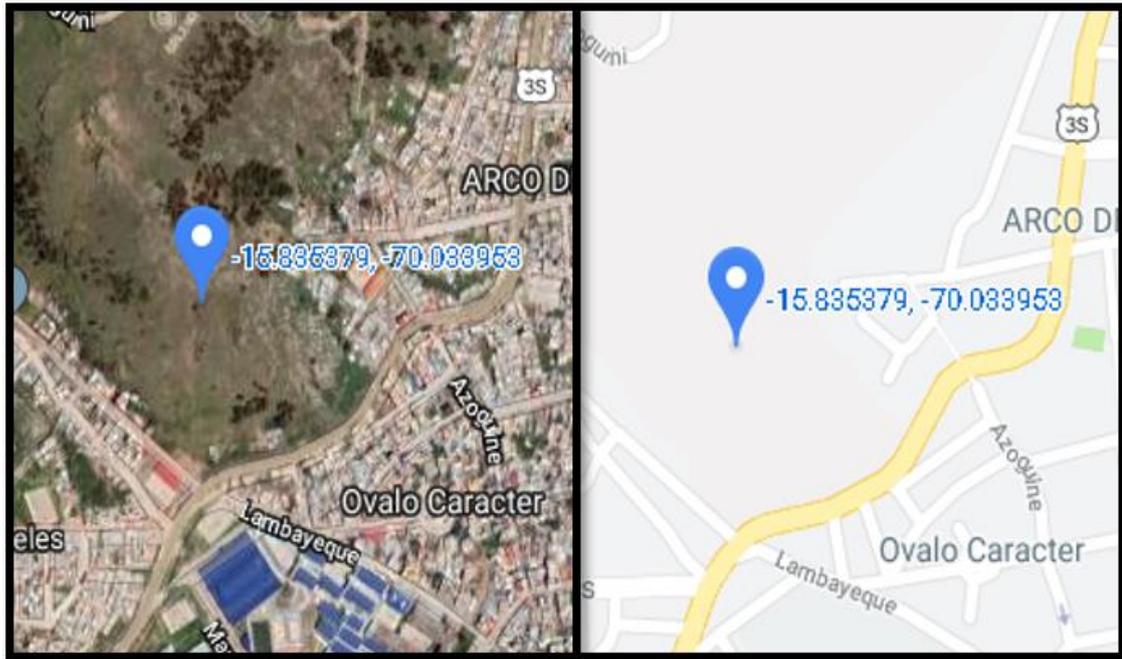


Figura 10. Ubicación geográfica de los socavones del cerro Azoguine. (Elaboración propia)

El proyecto de investigación se ejecutó en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química.

3.2.3. Variables

El presente estudio de trabajo consta de tres variables:

Variable independiente

- a. Concentración de glutamato monosódico (GMS).
- b. pH.
- c. Tiempo de lixiviación.

Variable dependiente

Porcentaje de extracción de Cobre.

3.2.4. Determinación del modelo cinético de lixiviación

El modelo que mejor permite cuantificar el comportamiento real es el modelo del núcleo sin reaccionar. Benner B., Roman R., (1974)



a) Control por difusión en capa porosa

El control por difusión en la capa porosa del modelo del núcleo sin reaccionar se aplica la Ecuación de Levenspiel:

$$KD = 1 - 3(1 - XA)^{2/3} + 2(1 - XA) \quad \text{Ec. 3,1}$$

Donde:

XA = Fracción de A que reacciona.

KD = Inversa del tiempo necesario para que $XA=1$ (1/s).

t = Tiempo de lixiviación (s).

b) Control por reacción química

En este tipo de régimen de control la velocidad de reacción es proporcional al tamaño de la superficie del núcleo sin reaccionar. El control por reacción química del modelo del núcleo sin reaccionar se aplica la Ecuación de Levenspiel:

$$KD = 1 - (1 - XB)^{1/3} \quad \text{Ec. 3,2}$$

Donde:

XB = Fracción de B que reacciona

KD = Inversa del tiempo necesario para que $XB=1$ (1/s)

t = Tiempo de lixiviación (s).

3.2.5. Análisis de mineral oxidado de cobre (método del ácido perclórico)

El análisis del mineral de cobre se realizó por el método de ácido perclórico para cobre.

1. Se pesó 0,5g de mineral finamente molido malla -200 y transferir en un matraz Erlenmeyer de 250mL.
2. Se agregó 2g de carbonato de amonio, 35mL de hidróxido de amonio concentrado y 65mL de agua destilada tapar con tapón de jebe o de hule y agitar fuertemente durante 15 minutos.



3. Se dejó reposar durante 24 horas, luego se filtra en papel filtro recibiendo el filtrado en un vaso de precipitado de 250mL y lavar 3 veces con agua destilada caliente (nota desechar el residuo sólido que queda sobre el papel filtro).
4. Se llevó a sequedad total en una estufa eléctrica a condiciones ambientales.
5. Se agregó 10mL de ácido perclórico se calienta hasta que se disuelva y luego directamente sobre la cocinilla eléctrica hasta fuerte desprendimiento de vapores de HClO_4 (no llevar a ebullición).
6. Se dejó enfriar, se agregaron 50mL de agua destilada, se hierve durante 5 minutos y se enfría a temperatura ambiente.
7. Se añadieron 3g de fluoruro de sodio para enmascarar al hierro, agregar 1g de yoduro de potasio y se titula con solución tiosulfato de sodio 0,08N usando almidón como indicador.
8. Cálculos.

$$\%Cu = \frac{V*N*meqNa_2S_2O_3}{\text{peso mineral}} \quad \text{Ec. 3,3}$$

3.2.6. Lixiviación de cobre con reactivo glutamato monosódico (pruebas)

La lixiviación de minerales de cobre se inicia con preparación física de minerales y su posterior tratamiento químico, tal como se describe a continuación:

1. Se preparó 100mL de solución de glutamato monosódico 0,5M y luego se transfiere en el vaso precipitado de 400mL.
2. Se ajustó la solución a pH 9,5 con óxido de calcio (cal).
3. Se pesó 20g de mineral molido 80% malla -200 y se agrega sobre la solución preparada de glutamato monosódico.



4. Se inicia la lixiviación por agitación mecánica tomando el tiempo $t=0$, se inicia la lixiviación con agitación continua durante 2 horas.
5. Terminado el tiempo de lixiviación se filtra la pulpa lavando los sólidos con agua destilada y luego se seca el sólido.
6. las muestras filtradas son guardadas en frascos adecuados con tapa y etiquetados.
7. Se analiza el cobre tanto en sólido y lixiviado por el método de titulación volumétrica y absorción atómica.

3.2.7. Cinética de lixiviación del cobre con reactivo glutamato monosódico

Se prepara la muestra y los reactivos para llevar a cabo la cinética de lixiviación que a continuación de detalla:

1. Se preparó 1L de solución GMS 0,25M y luego se transfiere en un vaso de precipitado de 1,5L.
2. Se pesó 45g de reactivo GMS (peso anexo E ecuación E.1), para preparar la solución de 1L.
3. Se ajustó la solución a pH a 9,5 con cal (CaO).
4. Se pesó 100g de mineral molido 80% malla -200 se agrega sobre la solución preparada de glutamato monosódico.
5. Se realizó el montaje de equipo de agitación mecánica en el laboratorio para la lixiviación por agitación del mineral de cobre.
6. Se inició la lixiviación por agitación mecánica a 300rpm tomando el tiempo $t = 0$, con agitación continua por 24horas, durante el proceso de lixiviación se toman alícuotas de 20mL de solución lixiviada a diferentes tiempos 01; 03; 06; 08; 21 y 24 horas respectivamente. En el proceso, se decanta por 10 minutos para la toma de alícuotas respectivamente.



7. Para análisis químico (concentración iones de cobre) de las muestras extraídas son guardadas en frascos adecuados con tapa y etiquetados.
8. Terminado el tiempo de lixiviación se filtró la pulpa, lavando los sólidos con agua destilada y luego se seca los sólidos. Los residuos de sólido obtenidos quedan como cenizas.

3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.3.1. Preparación del mineral

Se obtuvo la toma de muestra se sometió a proceso metalúrgico que es la operación unitaria que consiste en chancado, molienda, cuarteo, tamizado, pulverizado y clasificación del mineral. Las operaciones de conminución del mineral se ejecutarán en el laboratorio metalúrgico de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica UNA-PUNO.

Después del cuarteo se tomó 2Kg de mineral para análisis granulométrico, los resultados se muestran en la tabla 2, a continuación:

Tabla 2. *Análisis granulométrico de la muestra.*

Malla	Peso retenido	Porcentaje	Porcentaje acumulado %(+)	Porcentaje acumulado %(-)
N° 8	48.9	2.45	2.45	97.55
N° 10	49.87	2.50	4.94	95.06
N° 40	26.35	1.32	6.26	93.74
N° 60	25.46	1.27	7.53	92.47
N° 70	41.62	2.08	9.62	90.38
N° 80	92.98	4.65	14.27	85.73
N° 200	98.52	4.93	19.20	80.80



fondo	1615	80.80	100.00	0.00
	1998.7	100.00		

Fuente: elaborado por el equipo de trabajo

3.3.2. Preparación de solución lixiviante

Para alcanzar el objetivo específico número 1: Determinar la concentración de glutamato monosódico en la cinética de lixiviación de cobre; se aplicó la siguiente metodología. Se preparó la solución de glutamato monosódico de concentración de 0,25M. Se preparó en total 4 pruebas experimentales cada una con concentración, volumen y pH diferente. Las soluciones son preparadas considerando el peso molecular del glutamato monosódico (169,11 g/mol). Ver metodología de preparación de soluciones de lixiviación en anexo E.

3.3.3. Ajuste de la alcalinidad de la solución lixiviante.

Para alcanzar el objetivo específico número 2: Determinar el pH óptimo en el proceso de lixiviación de minerales óxidos de cobre; se aplicó la siguiente metodología. Se ajustó la solución de glutamato monosódico a pH 9,5 con óxido de calcio (CaO).

Uno de los aspectos de mayor relevancia en las pruebas experimentales es el ajuste de alcalinidad de todas las soluciones. La concentración de la alcalinidad debe ser igual a la inicial en todo el proceso de lixiviación, cada cierto intervalo de tiempo se midió con un potenciómetro el pH de la solución, con el fin de determinar en todo momento constante el pH.

3.3.4. Tiempo de lixiviación

Para alcanzar el objetivo específico número 3: Determinar el tiempo de lixiviación de mineral oxidados de cobre; se aplicó la siguiente metodología. Se instaló el equipo de agitación mecánica tomando el tiempo $t=0$, se inició la lixiviación con agitación continua durante 2 horas para las pruebas experimentales y posterior para la cinética de lixiviación $t=0$ con agitación continua durante 24 horas.

3.3.5. Condiciones de operación de prueba

Después de preparar el mineral, preparar la solución y ajustar el pH se procede a las pruebas de experimentación. Para obtener los datos experimentales que nos ayuden en el proceso de lixiviación, se trabaja con las variaciones de concentración, pH y volumen. Se preparó en total 04 soluciones, 02 soluciones de concentración 0,5M y otras 02 soluciones de concentración 0,25M a volumen y pH diferente a continuación.

Tabla 3. *Condiciones de operación prueba.*

Nombre	M-1	M-2	M-3	M-4
Relación solido- liquido(S/L)	1/5	1/5	1/10	1/10
Peso del mineral (g)	20	20	20	20
Volumen solución (mL)	100	100	200	200
Concentración (M)	0,5	0,5	0,25	0,25
Granulometría (malla)	-200	-200	-200	-200
Peso del GMS(g)	8,4555	8,4555	8,4555	8,4555
pH ajustar con CaO	9,5	10,5	9,5	10,5
Velocidad de agitación(rpm)	300	300	300	300
Tiempo de lixiviación (h)	2	2	2	2
Temperatura (°C) ambiente	15	15	15	15

Fuente: elaborado por el equipo de trabajo

El cálculo del peso para el GMS se realizó en base a la ecuación E.1, preparación de soluciones en el anexo E.

3.3.6. Toma de datos experimentales

Terminado el tiempo de lixiviación de pruebas de (2horas) se filtró la pulpa lavando los sólidos con agua destilada, las muestras filtradas son guardadas en frascos adecuados con tapa y etiquetados.



Durante el proceso de lixiviación (24horas) se tomaron seis tipos de muestras de 20mL de la solución, extraídas con pipetas calibradas. Cada cierto intervalo de tiempo (01, 03, 06, 08,21y 24horas) se extrajeron para determinar la concentración de cobre y estas son éstas son guardadas en frascos adecuados con tapa y etiquetados. Después de cada muestreo se repone el volumen de solución lixivante de manera de mantener el nivel constante.

3.3.7. Análisis químico de muestras

Una vez concluido las pruebas de lixiviación, el estudio fue complementado con el análisis químico de las soluciones lixiviadas (método absorción atómica anexo E), y análisis del mineral cobre (método del ácido perclórico) y son analizadas en el Laboratorios Analíticos de Sur de la ciudad de Arequipa acreditado por INACAL.

CAPÍTULOS IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADO DEL ANÁLISIS DE MINERAL OXIDADO COBRE

Una vez realizado la preparación del mineral se llevó a analizar la ley de cobre. Después de la conminución del mineral chancado y molienda se tiene un aproximado de 8Kg de mineral oxidado de cobre, se realiza primer cuarteo quedando 4Kg, segundo cuarteo 2Kg, tercer cuarteo 1Kg y por último el quinto cuarteo quedando 500g para su análisis en L.A.S. los resultados en la tabla 4.

Tabla 4. *Resultados de análisis de la muestra del mineral oxidado.*

Nombre de la muestra	Descripción de la muestra	Cu (%)
Cerro Azoguine	Mineral pulverizado aprox. 500g	3,72

Fuente: Laboratorio de ensayo acreditado por la dirección de acreditación de INACAL con registro N° LE-050.

Para corroborar los resultados ver certificado de análisis en el anexo D.1

4.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES

LIXIVIADAS DE COBRE PRUEBA

Los resultados obtenidos por cada prueba de lixiviación

En la sección 3.3.5 diseño de pruebas experimentales los resultados son:

Tabla 5. *Resultados de las pruebas de lixiviación del mineral oxidado de cobre.*

Nombre de muestra	M-1	M-2	M-3	M-4
Cu (mg/L)	1547	1385	974	863
Concentración (M)	0,5	0,5	0,25	0,25

Fuente: Laboratorio de ensayo acreditado por la dirección de acreditación de INACAL con registro N° LE-050.

Para corroborar los resultados ver certificado de análisis en el anexo D.2



4.3. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES DE COBRE

El resultado del porcentaje de extracción se realizó en base a los resultados obtenidos en la tabla 5.

Ejemplo para condiciones de operación M-3.

Peso del mineral : 20g.

Volumen de la solución : 200mL.

Ley de cobre : 3,72%.

Cálculo de peso del cobre en el mineral.

$$\text{Peso del cobre} = 20g * 3,72\%$$

$$\text{Peso del cobre} = 0,744g$$

$$\text{Densidad de la solución} = \frac{0,744g}{0,2L} = 3,72g/L$$

Cálculo de % cobre.

Resultado de análisis en laboratorio para (M-3) =974mg/L =0,974g/L.

$$\%Cu = \frac{0,974g/L}{3,72g/L} * 100$$

$$\%Cu = 26,19 (\% \text{ extracción})$$

Nota: el porcentaje de extracción obtenido es solo para un tiempo de 02 horas.



4.4. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE LAS SOLUCIONES LIXIVIADAS DE COBRE PRUEBAS

Tabla 6. *Porcentaje de extracción de cobre.*

Nombre	% extracción de Cu
M-1	20,79
M-2	18,61
M-3	26,19
M-4	23,21

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

En la tabla 6 se muestra que la mayor extracción de porcentaje de cobre es en la muestra (M-3) entonces podemos afirmar que las mejores condiciones de operación se encuentran en la M-3.

4.5. CONDICIONES DE OPERACIÓN ÓPTIMA

Razones por la cuales se eligió la (M-3).

- La relación que se maneja entre el peso del mineral y el volumen de la solución que fue (1/10) en esta condición se logró un mayor porcentaje de extracción de cobre que las demás relaciones que fueron de (1/5).
- El pH que fue de 9,5 se consiguió mayor porcentaje de extracción de cobre en comparación con el pH de 10,0.

Las condiciones de operación optima permite el mayor porcentaje de extracción de las soluciones lixiviadas de cobre es la condición de operación M-3. A continuación



Tabla 7. *Condiciones de operación óptima.*

Nombre	M-3
Relación solido-liquido	1/10
Peso del mineral (g)	20
Volumen solución (mL)	200
Concentración (M)	0,25
Granulometría (malla)	-200
Peso del GMS(g)	8,4555 =9 = 45g/L
pH ajustar con CaO	9,5
Velocidad de agitación(rpm)	300
Tiempo de lixiviación (h)	2
Temperatura (°C) ambiente	15

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

4.6. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DE COBRE.

Tabla 8. *Resultados de la lixiviación de cobre a diferentes tiempos.*

Tiempo(h)	Concentración(Cu mg/L)
01	700
03	1157
06	1642
08	1781
21	2451
24	2712

Fuente: Laboratorio de ensayo acreditado por la dirección de acreditación de INACAL con registro N° LE-050.

Para corroborar los resultados ver certificado de análisis en el anexo D.3

4.7. PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DE COBRE

Tabla 9. Cálculo de porcentaje de extracción de cobre.

Tiempo(h)	% Extracción cobre
01	18,81
03	31,10
06	44,13
08	47,88
21	65,88
24	72,89

Fuente: elaborado por el equipo de trabajo

Según tabla 9, se observa el porcentaje de extracción de cobre, para 01 horas se obtuvo un 18,81 % de extracción, y para un tiempo de 24 horas un 72,89% de cobre. Entonces decimos que la extracción es en forma ascendente según pasa el tiempo.

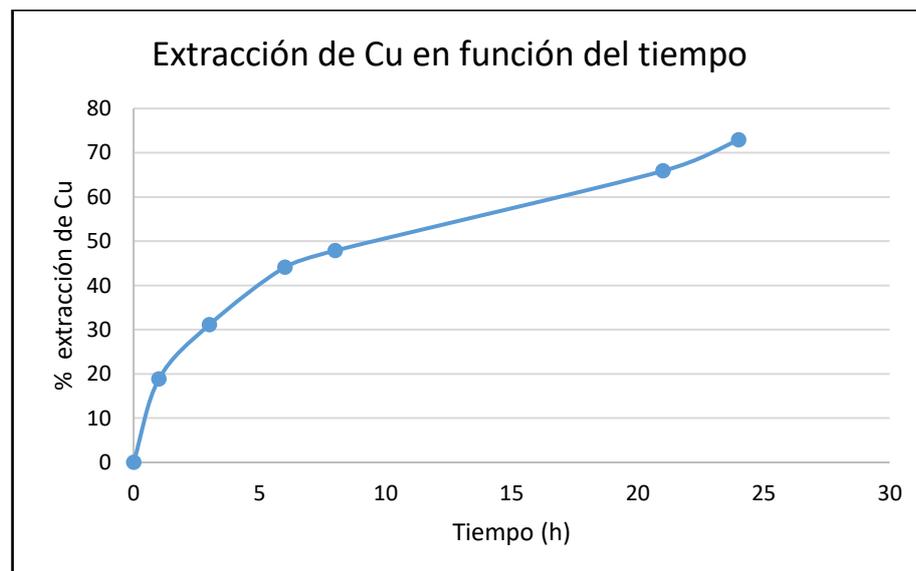


Figura 11. Porcentaje de extracción de cobre en función al tiempo.

Según la figura 11, se muestra el tiempo de lixiviación para el mineral oxidado de



cobre; en tiempos 01; 03; 06; 08; 21 y 24 horas. Los resultados obtenidos muestran que mientras más tiempo más extracción y la curva es en forma ascendente. La velocidad de reacción inicial es rápida en las primeras 8 horas.

Modelo matemático

El modelo matemático se obtuvo en función al tiempo y al porcentaje de extracción porque dentro del porcentaje de extracción se encuentran las condiciones óptimas y por ende las variables óptimas ya definidas como (pH y concentración).

Tabla 10. *Porcentaje de extracción de cobre en determinados tiempos*

Tiempo	% extracción cobre
01	18,81
03	31,10
06	44,13
08	47,88
21	65,88
24	72,89

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

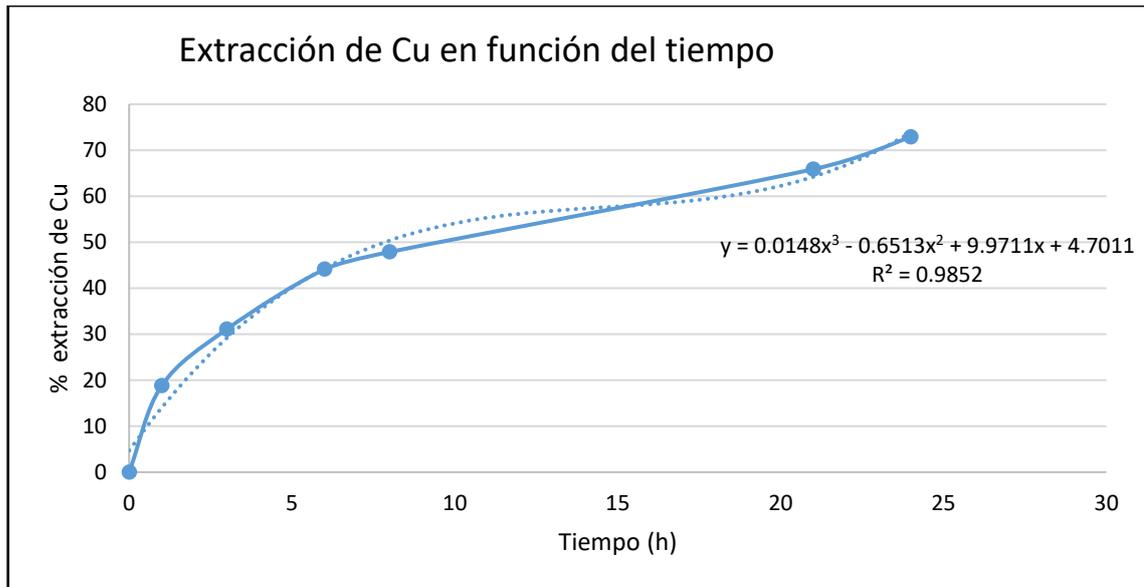


Figura 12. Modelo matemático.

$$y = 0,01148x^3 - 0,6513x^2 + 9,9711x + 4,7011$$

Donde:

y = porcentaje de extracción de cobre

x = tiempo de lixiviación

4.8. MODELOS DEL NÚCLEO SIN REACCIONAR

4.8.1. Control por reacción química

Tabla 11. Control por reacción química

Tiempo	$1 - (1 - XB)^{1/3}$
0	0,0
1	0,0671
3	0,1168
6	0,1764
8	0,1953

21	0,3012
24	0,3528

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Estos resultados se obtuvieron reemplazando el porcentaje de extracción de cobre en el modelo matemático control por reacción química. La tabla 11 muestra valores obtenidos en función al tiempo y en forma ascendente logrando un resultado de 24 horas 0,3528.

Estos resultados guardan relación con los que sostienen Uchiri M. (2018) que a partir de un tiempo inicial de 0 horas hasta 6 horas con resultado de forma ascendente de 0,0 a 0,64 de control por reacción química, así mismo Argote R. (2017) sostiene que a partir de un tiempo de 0 minutos hasta 80 minutos con resultados de 0,0 a 0,9650 control por reacción química. Ello es acorde con lo que en este estudio se halla.

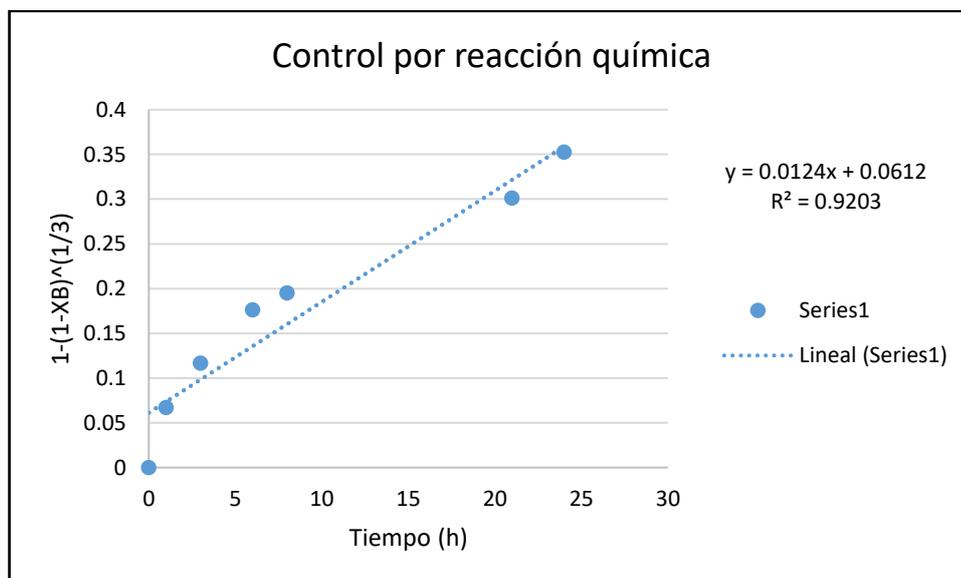


Figura 13. Control por reacción química

Según la figura 13, se observa el proceso de cinética de lixiviación, los datos ajustados al modelo de control por reacción química, cuya correlación es $R^2=0,9203$.

4.8.2. Control por difusión

Tabla 12. Modelo de control por difusión.

Tiempo	$1 - 3(1 - XA)^{2/3} + 2(1 - XA)$
0	0,0
1	0,0129
3	0,0377
6	0,0824
8	0,0995
21	0,2175
24	0,2856

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

Según tabla 12, se observa los resultados del modelo de control por difusión en capa porosa, aplicando la fórmula $1-3(1-XA)^{2/3}+2(1-XA)$, a partir de un tiempo inicial 0 horas hasta 24 horas con resultado de forma ascendente de 0,0 a 0,2856 de difusión.

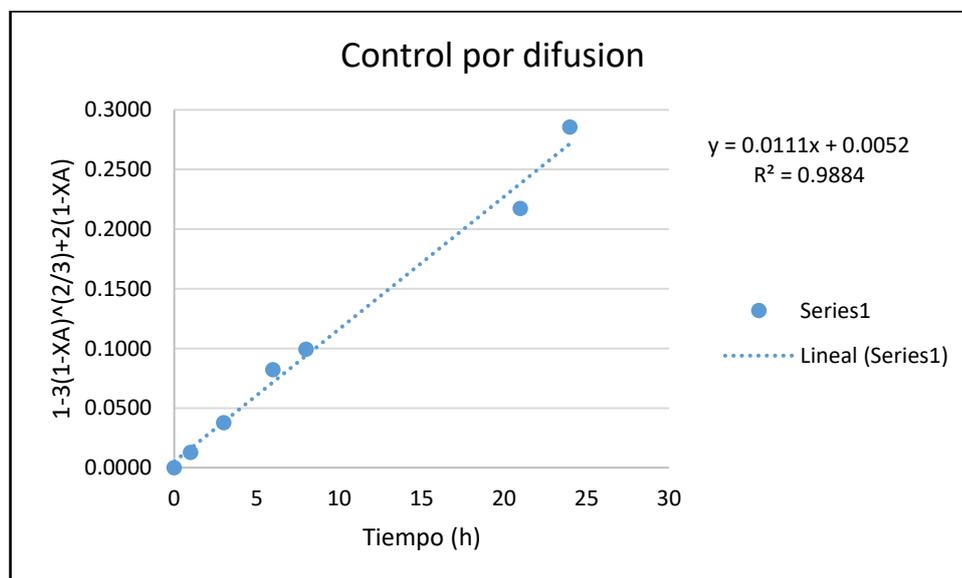


Figura 14. Control por difusión.

Comparación de modelos cinéticos según la figura 14, se observa el proceso de cinética de lixiviación, la correlación de la ecuación control por difusión el $R^2=0,9884$ es

mayor que la correlación control por reacción química $R^2 = 0,9203$; por lo tanto, este modelo se ajusta mejor a los datos obtenidos del proceso de lixiviación del mineral oxidado con glutamato monosódico.

4.9. CONDICIONES DE OPERACIÓN ÓPTIMAS DE LOS OBJETIVOS

Tabla 13. *Parámetros óptimos*

Concentración de glutamato monosódico(g/L)	45
pH óptimo.	9,5
Tiempo de lixiviación(horas)	24 horas
Constante de velocidad (K)	$1,11 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$
% de extracción (máxima)	72,89

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

4.10. DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE

A partir de los hallazgos encontrados, las condiciones de operación óptima son concentración de glutamato monosódico 45g/L, pH de 9,5 y tiempo de 24horas obteniendo un 72,89% de extracción de cobre, la relación solido/liquido (1/10) con una constante de velocidad de reacción $1,11 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Estos resultados guardan relación con Uchiri M., (2018), En su trabajo de “lixiviación de minerales oxidados de Cu con nitrato de amonio, en yacimiento minero socsan de pucará-puno” Los parámetros óptimos es 130 g/L de concentración de NH_4NO_3 , tiempo de 10 h y a un pH de 10,05 con un 95,6% de extracción de cobre y una constante de velocidad reacción $1,277 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. Argote R., (2017) En su investigación “Cinética de lixiviación de mineral de manganeso en solución de ácido sulfúrico utilizando agente reductor mazorca de maíz y trigo” obtuvo una velocidad de reacción



$6,8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Bustamante A., (2016), en su trabajo de “Lixiviación de cobre con EDTA en minerales oxidados de cobre de la Compañía Minera Tintaya Antapaccay” lixivió con EDTA a concentración 0,2 M, pH 12 y tiempo de agitación de 180 min; obteniendo una extracción del 74% de Cu. Similar resultado obtuvo Cárdenas et al., (2017) con relación sólido/líquido (Rs/L) 1/5, se consideró a un nivel de pH= 9,5 y un tiempo de lixiviación de 6 días, así obteniendo un porcentaje de recuperación del 65 % de cobre. Por otro lado Roldan y Urbina., (2015), en su trabajo “Lixiviación Amoniacal del Mineral de Cobre Tipo Crisocola Utilizando Nitrato de Amonio”, con pH 9,5; concentración del disolvente NH_3 3,706g/L – 6,672g/L y tiempo 5h; obteniendo un de 45,36 % de extracción de Cu. Estos resultados tienen concordancia citado por Garcés., (2015) indica que en la lixiviación de minerales depende de los factores de pH, tiempo y la velocidad de agitación; Por consiguiente, los resultados obtenidos del presente trabajo de investigación son similares a los resultados obtenidos citados en los párrafos precedentes y por lo tanto queda validado los resultados obtenidos.

Tabla 14. Cuadro comparativo de extracción de cobre.

Testistas	Mineral	Reactivo	Concentración (g/L)	pH	Tiempo(h)	% Extracción	Vel. RQ (s ⁻¹)	Confiabil Vel. Dif (s ⁻¹)	Confiabilidad
Mamani F., 2019	cobre	GMS	45	9,5	24	72,89	1,24*10 ⁻²	1,11*10 ⁻²	98,84
Uchiri M., 2018	cobre	Nitrato Amonio	130	10,05	10	95,6	1,053*10 ⁻¹	1,277*10 ⁻¹	97,3
Bustamante A., 2016	cobre	EDTA	0,2 molar	12	3	74	.....	.....	.....
Cardenas R., 2017	cobre	Nitrato Amonio	34	9,5	144	65	.....	.....	.....
Roldan F., Urbina J., 2015	cobre crisocola	Nitrato Amonio	3,706	9,5	5	45,36	.....	.....	.....
Argote R., 2017	manganeso	A. sulfuri maiz y trigo	.....	.....	.....	.....	6,8*10 ⁻³	.....	.....
Ccari N., 2018	oro	sandioss	8	11	72	.....	.....	.....	.....
Perez F., 2016	cobre cuprita	Hidroxido Amonio	0,05-0,25 molar	10,05	.....	99	.....	.....	.....
Cordova J., 2016	cobre crisocola	H2SO4 y acido cítrico	20	...	.....	85,73	.....	.....	.....
Bingol D., 2005	cobre malaquita	Hidroxido Amonio y Carbonato	5M ; 0,3M	...	3	98	.....	.....	.....

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo



V. CONCLUSIONES

La concentración de glutamato monosódico (45g/L) en la cinética de lixiviación de óxidos de cobre del cerro Azoguine-Puno. Con una ley de 3,72%, una agitación de 300rpm y a temperatura ambiente. Además, ha permitido disolver los óxidos de cobre.

El pH óptimo (9,5) en el proceso de lixiviación de minerales óxidos de cobre, con una relación solido liquido (1/10) en soluciones alcalinas si se puede disolver los óxidos de cobre.

El tiempo es de 24horas en la lixiviación de mineral óxidos de cobre logrando una extracción del 72,89% es importante que a mayor tiempo de lixiviación mayor porcentaje de extracción la granulometría del mineral malla -200 con un volumen de 1 litro.

Se determinó la constante de velocidad de reacción ($1,11 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$), el modelo que mejor permite cuantificar el comportamiento real es el modelo del núcleo sin reaccionar. La velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de difusión del reactivo.



VI. RECOMENDACIONES

- A los futuros trabajos de investigación relacionados a lixiviación por agitación de minerales de cobre con glutamato monosódico.
- Aumentar el tiempo de lixiviación a 48horas, 72horas y la temperatura a 25°C para tener una mayor extracción en menos tiempo de lixiviación.
- Realizar pruebas experimentales utilizando agentes oxidantes para reducir el tiempo de lixiviación y pruebas experimentales para minerales sulfurados de cobre con glutamato monosódico.
- Realizar pruebas experimentales para la obtención de cobre electrolito a partir de las soluciones de lixiviación con glutamato monosódico.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Argote, R. (2017) “Cinética de lixiviación de mineral de manganeso en solución de ácido sulfúrico utilizando agente reductor mazorca de maíz y trigo” Universidad Nacional del Altiplano.
- Ata, O.N., Colak, S., Ekin, M., Copur, M., (2001). Determination of the optimum 340 conditions for leaching of malachite ore in H₂SO₄ solutions. Chem. Eng. Technol.
- Bartlett, R. (1998). Solution Mining: leaching and Fluid Recovery of minerals, 2da ed.
- Benner, B., Roman, R. (1974). Determination of the Effective Diffusivity of H Ions in a Copper Ore. Society of Mining Engineers, Vol. 256.
- Bingol, D., Canbazoglu, M., & Aydogan, S. (2005). Dissolution Kinetics of Malachite in Ammonia. Hydrometallurgy.
- Bustamante, A. C. (2016). Lixiviación de cobre con EDTA en minerales oxidados de cobre de la Compañía Minera Tintaya Antapaccay. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Butt, A. (1970) copper: the science and technology of the metal, its alloys and compounds.
- Cárdenas, R., López Díaz, A., & Cruz Medina, F. (2017). Sistema de Gestión ISO 9001: Técnicas y herramientas de Ingeniería de Calidad para su Implementación. Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Ccari, N.N. (2018). Lixiviación de minerales de oro con reactivo sandioss en la empresa minera colibrí s.a.c Puno – Perú Universidad nacional del altiplano



- Cordova, J.A., & Campos E. (2016). “Influencia del tipo y concentración del agente lixiviante en la extracción de cobre mediante lixiviación por agitación de un mineral tipo crisocola” Trujillo – Perú
- Current EU approved additives and their E Numbers, Food.gov.uk, 26 de noviembre de 2010, consultado el 30 de enero de 2012
- Domic, E. (2001). Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones.
- Ekstenn J. J., Oraby E. A., Tanda B. C. (2017). A conceptual process for copper extraction from chalcopyrite in alkaline glycinate solutions, *Minerals Engineering*, volume 108, pages 53-66.
- Garcés, L., Gutiérrez, A., Meyer, M., Vaca, O., Reyes, P., & Vega, H. (2010). Laboratorio de Molienda y Tamizado Operaciones con Sólidos. Colombia: Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería.
- Guiachetti, D.A. (2011) Consumo de ácido sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre. Santiago – Chile: Universidad de Chile
- Habashi, F. (1983). Trends in the Hydrometallurgical Treatment of Copper Oxides Ores. *Arab Mining Journal*.
- Ikeda, K. (noviembre de 2002). «New seasonings». *Chem Senses* 27 (9): 847-849. PMID 12438213. doi:10.1093/chemse/27.9.847.
- Levenspiel, O. (1986). *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. 1987. pp. 397 – 411. Capítulo 12: Reacciones sólido – fluido.
- Loliger, J. (abril de 2000). «Function and importance of Glutamate for Savory Foods». *Journal of Nutrition* 130(4s Suppl):



- Miller, G., Newton T. Copper heap leach testing, interpretation and scale up. ALTA Copper Hydrometallurgy Forum, QLD, 1999.
- Ninomiya, K. (1998). «Natural occurrence». Food Reviews International 14 (2 & 3):
- Nobel Lectures, Chemistry 1901-1921, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1966.
- Oraby, E. A. Eksteen. J. J. (2014). the selective leaching of cooper from a gold–copperconcentrate in glycine solutions, Hydrometallurgy, Volume 150, December 2014, Pages 14-19.
- Pérez, F. (2016). Lixiviación de cuprita en ambiente básico con hidróxido de amonio. Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Reporte de conflictos sociales febrero 2010 puno, Perú. recuperado de <https://www.defensoria.gob.pe>
- Roldan, F., & Urbina, J. (2015). Lixiviación Amoniacal del Mineral de Cobre Tipo Crisocola utilizando Nitrato de Amonio. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
- Salvador, R. (2004)., “Tecnología Metalúrgica y Cambio cultural en la prehistoria de la península ibérica”, Revista de Historia Vol.17
- Surco, M. (2012). Optimización del proceso de aglomeración y lixiviación en una planta de lixiviación de cobre. Lima-Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Tanda, B. C. Eksteen J. J., Oraby E. A. (2018). Kinetics chalcocite leaching in oxygenated alkalineglycine solutions, Hydrometallurg Volume 178, June 2018, Pages 264-273.



- Tauetsile, P. J., Oraby E. A., Eksteen J. J. (2018). Adsoption Behaviour of copper and gold glycinates in alkaline media onto activated carbon. Hydrometallurgy, volume 178, pages 202-208.
- Tebbutt, T. (1990). Fundamentos de Control de la Calidad del Agua. Tercera Edicion. Editorial Limusa. México.
- Uchiri, M. (2018), En su trabajo de “lixiviación de minerales oxidados de Cu con nitrato de amonio, en yacimiento minero socsan de pucará-puno”
- Weiss, N.L. (1985). “SME - Mineral Processing Handbook - Volume 11 -Section 13: Hydrometallurgy”, editor ed. SME, EEUU.



ANEXOS

Anexo A: Obtención de la muestra de mineral oxidado de cobre.

Anexo B: Pruebas de lixiviación de mineral oxidado de cobre.

Anexo C: Envío de muestras.

Anexo D: Certificado de los resultados de análisis.

Anexo E: Metodologías experimentales.

ANEXO A

Obtención de la muestra de mineral oxidado de cobre.



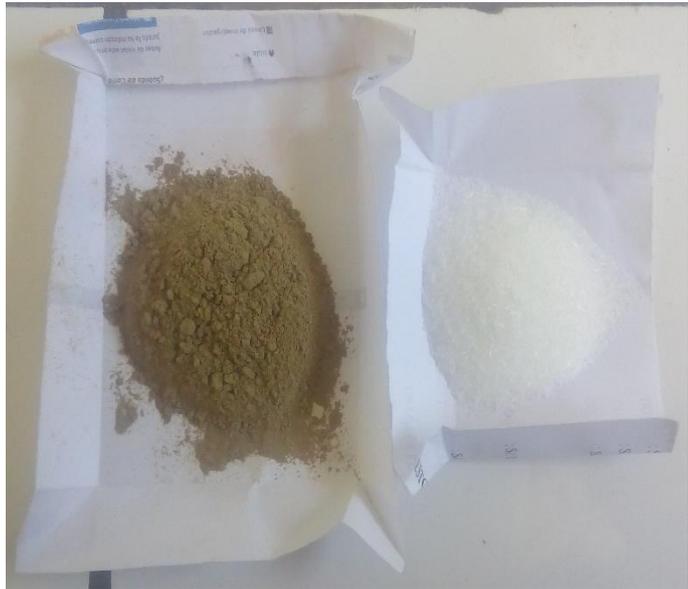
A 1. Muestra de los socavones.



A 2. Molino de bolas.

ANEXO B

Lixiviación de mineral oxidado de cobre.



B 1. Pesado de mineral de cobre y reactivo glutamato monosódico.



B 2. Ajuste de pH y lixiviación por agitación.



B 3. Filtración de la pulpa de cobre.

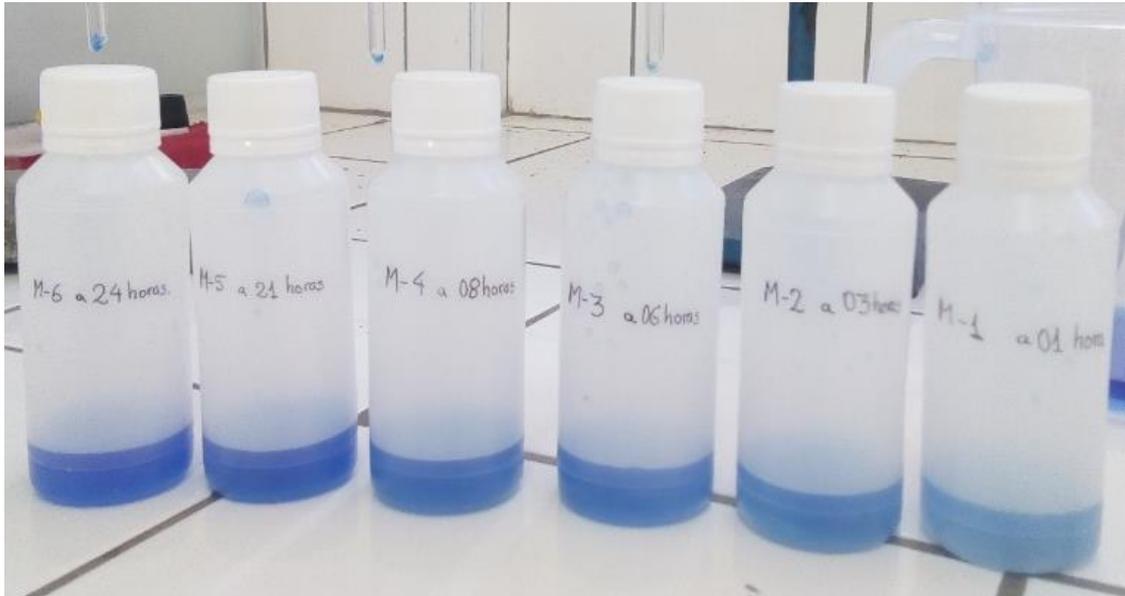


B 4. Muestra filtrada y envasado.



ANEXO C

Envío de muestras al laboratorio LAS



C 1. Envasado de la solución de cobre para análisis



C 2. Envasado de pruebas de lixiviación.



C 3. Soluciones de lixiviación pruebas.



C 4. Vista general de pruebas de lixiviación.



ANEXO D

Certificado de los resultados de análisis



Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL
INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N°LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-AC-19-00708

Fecha de emisión: 22/05/2019

Página 1 de 1

Señores: MAMANI LARICO FREDY
Dirección: JR. JOSE MARIA ARGUEDAS 692 - YUNGUYO - PUNO
Atención: MAMANI LARICO FREDY
Recepción: 21/05/2019
Realización: 21/05/2019
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Métodos ensayados

502 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica - 2013 (METODO DE ENSAYO ACREDITADO)

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	502
				Cu %
MN19005397	CERRO AZOGUINE	No proporcionado por el cliente.	mineral pulverizado	3,72

Sixto Vicent
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicent Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(* Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL - DA.
* <Valor numérico> = Limite de detección del método, * <Valor Numérico> = Limite de cuantificación del método.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Parque Industrial Rio Seco C - 1 Cerro Colorado - Arequipa - Perú
Teléfono (054) 443294 Fax (054) 444582 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

A-18 N° 6581

D.1: Resultado de porcentaje de cobre (ley de cabeza).



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Tel: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-19-00242

Fecha de emisión: 21/05/2019

Página 1 de 1

Señores: MAMANI LARICO FREDY
Dirección: JR. JOSE MARIA ARGUEDAS 692 - YUNGUYO - PUNO
Atención: MAMANI LARICO FREDY
Recepción: 21/05/2019
Realización: 21/05/2019
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Métodos ensayados

*4015 Método de ensayo para Cobre por Absorción Atómica en soluciones alcalinas lectura Directa

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*4015 Cu mg/L
SS19000632	M - 1 A 2 HORAS	No proporcionado por el cliente.	Solución Alcalina	1547
SS19000633	M - 2 A 2 HORAS	No proporcionado por el cliente.	Solución Alcalina	1385
SS19000634	M - 3 A 2 HORAS (Glutamato de Cobre)	No proporcionado por el cliente.	Solución Alcalina	974
SS19000635	M - 4 A 2 HORAS	No proporcionado por el cliente.	Solución Alcalina	863

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

"<Valor numérico" = Límite de detección del método, "Valor Numérico" = Límite de cuantificación del método.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Nº 11663

D.2 Resultados de pruebas de lixiviación de mineral oxidado de cobre.



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Telf: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-19-00266

Fecha de emisión: 01/06/2019

Página 1 de 1

Señores: MAMANI LARICO FREDY
Dirección: JR. JOSE MARIA ARGUEDAS 692 - YUNGUYO - PUNO
Atención: MAMANI LARICO FREDY
Recepción: 01/06/2019
Realización: 01/06/2019
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Lugar de análisis: Parque Industrial de Río Seco C-1 Cerro Colorado Arequipa Perú

Métodos ensayados

*4015 Método de ensayo para Cobre por Absorción Atómica en soluciones alcalinas lectura Directa

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*4015
				Cu mg/L
SS19000697	M-1 a 01 hora	PUNO	Solucion	700
SS19000698	M-2 a 03 horas	PUNO	Solucion	1157
SS19000699	M-3 a 06 horas	PUNO	Solucion	1642
SS19000700	M-4 a 08 horas	PUNO	Solucion	1781
SS19000701	M-5 a 21 horas	PUNO	Solucion	2451
SS19000702	M-6 a 24 horas	PUNO	Solucion	2712

(c) : datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza por la información suministrada por el cliente.

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicento Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

^a<Valor numérico> = Límite de detección del método, ^b<Valor Numérico> = Límite de cuantificación del método.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Nº 12063

D.3 resultados de la cinética de la lixiviación



ANEXO E

Metodologías experimentales

Preparación de soluciones de lixiviación pruebas

Se prepara en total 04 soluciones, 02 soluciones de concentración 0,5M y otras 02 soluciones de concentración 0,25M a volúmenes y pH diferentes. A continuación

Tabla E.1. Preparación de soluciones

Nombre	M-1	M-2	M-3	M-4
Volumen (mL)	100	100	200	200
Concentración (M)	0,5	0,5	0,25	0,25
pH	9,5	10,5	9,5	10,5

Fuente: elaboración propia.

Las soluciones son preparadas considerando el peso molecular del GMS (169,11g/mol). Para calcular el peso del reactivo se usa la siguiente ecuación:

$$w = M * PM * V \quad \text{Ec. E.1}$$

Donde:

W= peso del reactivo (g).

M= molaridad (mol/L).

PM=peso molecular (g/mol).

V=volumen de la solución (L).

(Ejemplo para M-1) ¿Cuál es el peso para preparar 100mL de solución glutamato monosódico 0,5M? PM=169,11g/mol.

$$w = 0,5\text{mol/L} * 169,11\text{g/mol} * 0,1\text{L}$$

$$w = 8,4555\text{g} < 9\text{g} >$$



1. Se prepara 100mL de solución de glutamato monosódico 0,5M y luego se transfiere en el vaso precipitado de 400mL.
2. Se ajusta la solución a pH 9,5 con cal (CaO).

Determinación de la Concentración de Cobre por absorción atómica

La determinación de la concentración de cobre se hace mediante absorción atómica. Este método instrumental se basa en la absorción, emisión y fluorescencia de radiación electromagnética por partículas atómicas. Básicamente, la absorción atómica consiste en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular. La especie atómica se logra por atomización de la muestra. La técnica de atomización utilizada es a través de una llama, que nebuliza la muestra y luego la disemina en forma de aerosol dentro de una llama de aire de acetileno.

La metodología seguida para la medición de la concentración de cobre en solución fue la siguiente:

1. De cada muestra, se extraen 2mL y se diluyen 12,5 veces con agua ácida pH 1,6 en un matraz aforado de 25mL. Esta solución se agita con el fin de homogenizarla. Se hace esta dilución ya que el espectrómetro no es capaz de medir soluciones concentradas de cobre.
2. Se preparan los estándares con el fin de calibrar el espectrómetro. Estos corresponden a soluciones de sulfato de cobre con agua ácida, de manera de tener distintas concentraciones de cobre en solución.
3. Una vez que se tiene el equipo calibrado, se procede a la medición de las muestras, entregando el resultado en mg/L.
4. Finalmente, se calcula la concentración de cobre multiplicando el valor que entrega el equipo por 12,5, que corresponde a la dilución hecha inicialmente.