

Biolixiviación de mineral cuarzo por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en reactor de columna por gravedad

Ronald Huarachi-Olivera^{a,b,✉}, Alex Dueñas-Gonza^b, Ursulo Yapo^b, Moisés Almanza^b,
Dennys Manuel^b, Antonio Lazarte-Rivera^b, Gelbert Mogrovejo-Medina^c, Homar Taco-Cervantes^c,
Mario Esparza^a

^a Universidad de Antofagasta, Facultad de Ciencias del Mar y Recursos Biológicos, Departamento de Biotecnología, Laboratorio de Biominería, Av. Angamos 601, Antofagasta, Chile

^b Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Escuela Profesional de Biología, Laboratorio de Microbiología y Biotecnología, Arequipa, Perú

^c Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Laboratorio de Concentración de Minerales, Arequipa, Perú
(✉ Autor para la correspondencia: ronald.olivera@uantof.cl; rhuarachi@unsa.edu.pe)

Enviado: 6 Mayo 2016 Aceptado: 16 Febrero 2017 Publicado on-Line: 7 June 2017

RESUMEN: La biolixiviación es el proceso mediante el cual se extrae cobre de minerales sulfuros de baja ley usando microorganismos. La lixiviación química se aplica preferentemente para extraer cobre de minerales oxidados o mixtos, pero no existe información de aplicación de microorganismos en esta operación. En tal sentido, en la presente investigación se trabajó con reactores en columna por gravedad para procesos de lixiviación química, con cultivos bacterianos de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en medio 9K y mineral de cuarzo que contenía cuprita y pirita, con diferentes tamaños de partícula. Se encontró que después de 24 días de lixiviación química se recuperó el 86% de cobre cuando se incluyeron bacterias, mientras que sin ellas sólo se recuperó el 54%. La mayor recuperación de cobre en ambos procesos se obtuvo en el siguiente orden de acuerdo al tamaño de partícula: 9,5 mm > 12,5 mm > 19,05 mm. Así, la aplicación de células bacterianas a procesos lixiviación química con minerales oxidados de cobre que incluyen cuarzo y células de *A. ferrooxidans*, aumenta la recuperación de cobre cuanto menor sea el tamaño de partícula del mineral. Esta tecnología puede ser utilizada por empresas mineras que aún siguen realizando lixiviación química convencional y se puede incluir en la operación la adición de microorganismos para aumentar la recuperación de cobre de minerales sulfurados incluyendo cuarzo.

PALABRAS CLAVE: Biolixiviación; Cuarzo; Cuprita; Lixiviación; Pirita

Citar como/Citation: Huarachi-Olivera, R.; Dueñas-Gonza, A.; Yapo, U.; Almanza, M.; Manuel, D.; Lazarte-Rivera, A.; Mogrovejo-Medina, G.; Taco-Cervantes, H.; Esparza, M. (2017) "Biolixiviación de mineral cuarzo por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en reactor de columna por gravedad". *Rev. Metal.* 53(2):e096. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.096>

ABSTRACT: *Quartz mineral bioleaching by Acidithiobacillus ferrooxidans in gravity column reactor.* Bioleaching is the process by which copper is extracted from low-sulfur minerals using microorganisms. However, chemical leaching is preferably applied to extract copper from oxidized or mixed minerals, without reports of application of microorganisms in this operation. In this work, we investigated the presence of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in 9K medium and quartz mineral, with quartz sandstone, cuprite and pyrite at different particle sizes. It was found that at 24 days of the chemical leaching process 86% of copper was recovered when bacteria were included and only 54% recovered without them. The highest copper recovery in both processes was obtained in the following order according to the particle size: 9.5 mm > 12.5 mm > 19.05 mm. The application of bacterial cells to chemical leaching processes with oxidized copper minerals including quartz and *A. ferrooxidans* cells increases

copper recovery while the mineral particle size is lower. This technology may be used for mining companies that are still performing chemical leaching and may include in the operation the addition of microorganisms to increase copper recovery from mineral sulfides including quartz.

KEYWORDS: Bioleaching; Cuprite; Leaching; Pyrite; Quartz

ORCID ID: Ronald Huarachi-Olivera (<http://orcid.org/0000-0002-3504-3399>); Alex Dueñas-Gonza (<http://orcid.org/0000-0001-6506-9138>); Ursulo Yapó (<http://orcid.org/0000-0002-5863-129X>); Moisés Almanza (<http://orcid.org/0000-0001-7223-7590>); Dennys Manuel (<http://orcid.org/0000-0002-5186-4963>); Antonio Lazarte-Rivera (<http://orcid.org/0000-0002-9333-0505>); Gelbert Mogrovejo-Medina (<http://orcid.org/0000-0003-2978-6433>); Homar Taco-Cervantes (<http://orcid.org/0000-0003-0912-749X>); Mario Esparza (<http://orcid.org/0000-0003-3604-6054>)

Copyright: © 2017 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) España 3.0.

1. INTRODUCCIÓN

La biolixiviación es la extracción de metales por medio de microorganismos. En la actualidad, es una alternativa económica a las técnicas convencionales de tostación o de oxidación a presión en minerales sulfídicos de baja ley. Esta tecnología ecológica y de bajo costo, se convierte en una importante alternativa cuando los recursos minerales son cada vez más complejos y de bajo grado, ofreciendo una serie de ventajas económicas frente a los enfoques convencionales, atrayendo una amplia atención en la industria minera (Rohwerder *et al.*, 2003; Hedrich *et al.*, 2016). En las minas de cobre, el metal tiene distintas formas, entre ellas, como el cobre nativo a quien acompaña como ganga el cuarzo. Por ejemplo, los minerales primarios de la mina de cobre Jiangxi Dexing, contiene aproximadamente el 89% de minerales de la ganga, principalmente cuarzo y sericita (Sánchez y Bello 2009; Wu *et al.*, 2009) encontrándose comúnmente en una gran variedad de minerales. Estos minerales pueden afectar a la recuperación de cobre (Dong *et al.*, 2013) y también a la tasa de lixiviación y a la velocidad de lixiviación en procesos de biolixiviación de minerales (Styriaková *et al.*, 2004).

En la bibliografía científica se describen varios procesos de biolixiviación en columna usando los minerales sulfurados de cobre mostrando una recuperación del 80 - 90% del cobre (Kodali *et al.*, 2011). En concentrados polimetálicos (Cu: 2,5%; Zn: 30%; Fe: 8%; Pb: 13%) con consorcios bacterianos como *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* se recuperó el 85% de cobre (Tipre y Dave, 2004). En esfalerita (Zn 30%), calcopirita (Cu 2,5%), galena (Pb 13%), pirita (Fe 9%) y 27% de sulfuros, usando *Leptospirillum ferriphilum*, se recuperó el 78% de cobre (Patel *et al.*, 2012). En minerales de bajo grado (Cu - 0,3%) un estudio a escala piloto (1000 Tm) se llevó a cabo en 220 días en el proyecto de cobre Malanjhand, Madhya Pradesh, India, mostrando una recuperación de 0,14%/día (2,37 kg·d⁻¹) de cobre (Panda *et al.*, 2012). En mineral de calcopirita, se recuperó el 51,34% de cobre con un pH=2 después

de 30 días (Wang *et al.*, 2008). No existen antecedentes de estudios de procesos de biolixiviación usando directamente cuarzo como mineral. Sólo se describen los efectos del cuarzo sobre la biolixiviación de la calcopirita por *Acidithiobacillus ferrooxidans*, mejorando la recuperación de cobre (Mo *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2013). Otros resultados mostraron que además del cuarzo, la sericita también mejora la biolixiviación de la calcopirita, mientras que minerales como la dolomita lo inhiben debido a sus propiedades alcalinas (Xiaolan *et al.*, 2013).

El propósito de este trabajo fue investigar la recuperación de cobre, a partir del mineral cuarzo-pirita por biolixiviación y lixiviación química usando reactores de columna por gravedad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Cultivo bacteriano

Cepas de *Acidithiobacillus ferrooxidans* se cultivó utilizando el medio 9K-Fe [(NH₄)₂SO₄: 3,0 gL⁻¹; KCl: 0,1 gL⁻¹; K₂HPO₄: 0,5 gL⁻¹; MgSO₄·7H₂O: 0,5 gL⁻¹; Ca(NO₃)₂: 0,005 gL⁻¹; FeSO₄·7H₂O: 44,2 gL⁻¹; 5 mL H₂SO₄ concentrado/L] pH=1,5 (Schnell, 1997). Posteriormente, se realizó la adaptación de las células *A. ferrooxidans* reduciendo las concentraciones de FeSO₄·7H₂O del 100%, 75%, 50%, 25%, 12,5% al 0% para la biolixiviación. El recuento de células se realizó utilizando una en cámara de Petroff-Hausser.

2.2. Cultivo en reactor de tanque agitado

Un reactor de tanque aireado y agitado de 10 litros de capacidad se diseñó específicamente para el cultivo de células *A. ferrooxidans*. El diagrama esquemático del reactor se ilustra en la Fig. 1 (Patel *et al.*, 2014).

2.3. Mineral

El mineral de cuarzo utilizado tiene una ley en cobre de 0,74% obtenido de una mina de la región Arequipa, Perú (16°46'4" S; 71°21'11" W; 2,562 m.s.n.m.). El mineral fue caracterizado mediante

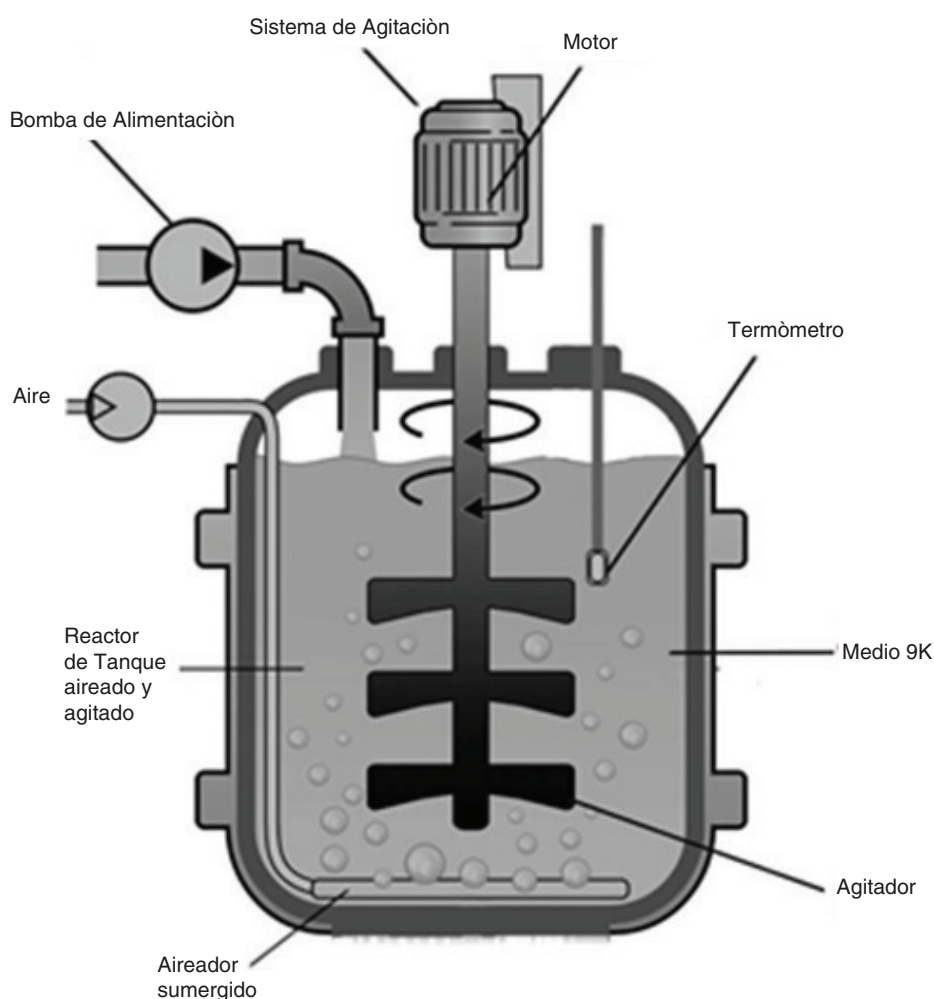


FIGURA 1. Diagrama del reactor de tanque aireado y agitado.

difracción de rayos X (Siemens, modelo D5000). El mineral contiene en su composición elementos químicos como Si en forma de cuarzo, Fe en forma de pirita (FeS_2), sulfuro de hierro (FeS), magnetita (Fe_3O_4), además de Cu en forma de compuestos oxidados como cuprita (Cu_2O). El tamaño de partícula para las pruebas de biolixiviación y lixiviación química se obtuvo mediante trituración y molienda de las muestras del mineral de cuarzo en tres tamaños: grueso ($<19,05$ mm); medio ($<12,5$ mm) y medio fino ($<9,5$ mm), usando un molino semiautogeno (SAG) de 500 Kg de capacidad marca ABB.

2.4. Sistema de reactores de columnas por gravedad

Los experimentos de biolixiviación y lixiviación química se realizaron a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) en 9 reactores de columna por gravedad (Fig. 2) que fueron fabricados con 0,2 cm de espesor de PVC. La altura de la columna fue de 75 cm, el diámetro interno de 6,5 cm; con un orificio de

10 mm de diámetro, colocado en la parte inferior. En cada columna se colocó 1 kg del mineral, con tres réplicas para cada tamaño de grano.

2.5. Estudio de biolixiviación

La biolixiviación de cada columna fue alimentada con 1000 mL de cultivo bacteriano ($1,5 \times 10^8$ cel mL^{-1}) utilizando bombas de aire modelo ACQ-001 (Electromagnetic Air Compress Boyu), con un caudal de aire de 5 Lmin^{-1} . La solución fue aireada diariamente para asegurar la disponibilidad de oxígeno que permitiera el proceso de biolixiviación.

2.6. Estudio de lixiviación química

La solución de lixiviación química (en condiciones estáticas) fue preparada con de H_2SO_4 al 4% (Hariprasad *et al.*, 2013) en cada sistema de columna por gravedad, con similares medidas descritas en el sistema anterior.

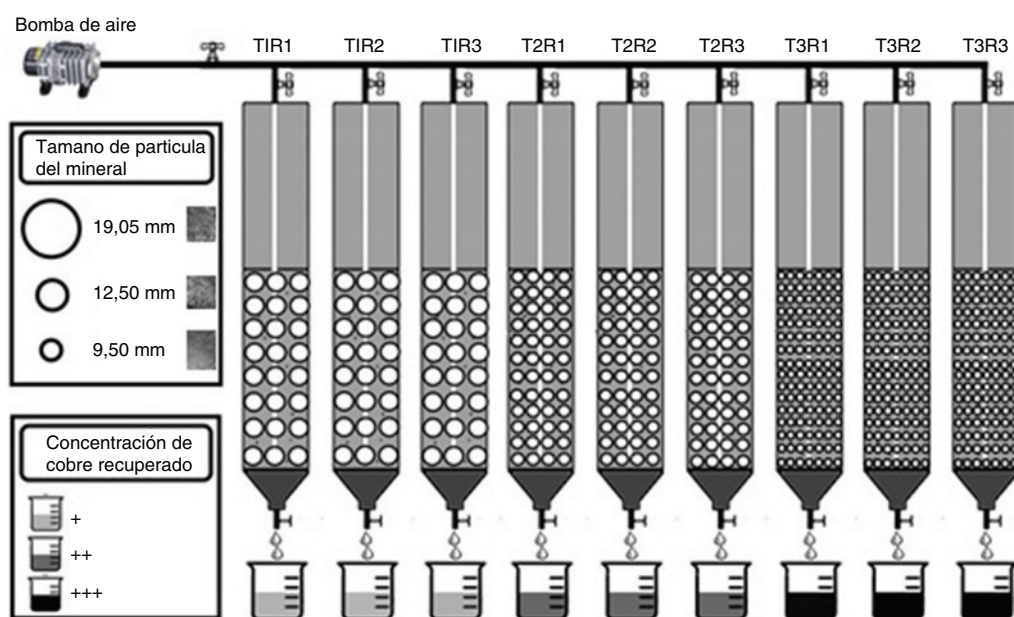


FIGURA 2. Representación esquemática de los sistemas de reactores de columna por gravedad para biolixiviación con *A. ferrooxidans* y lixiviación química.

2.7. Mediciones y análisis estadísticos

En las pruebas de biolixiviación y lixiviación química se realizaron mediciones cada 4 días. Se midió el pH, el potencial redox, usando el instrumento (JUMO type 202530) y el crecimiento de *A. ferrooxidans*, evaluado éste mediante recuento celular. La concentración de cobre y hierro total, en las muestras líquidas fue analizada con espectrofotómetro de absorción atómica con llama (GBC Scientific Equipment, modelo Avanta P, Australia). La concentración de hierro ferroso se determinó mediante el método volumétrico de valoración con dicromato potásico y la concentración de hierro férrico se calculó por diferencia entre el hierro total y hierro ferroso (Vogel, 1961).

Para la evaluación del crecimiento de *A. ferrooxidans*, se aplicaron gráficos de tendencia según el tiempo de evaluación. Para el pH, el potencial redox, así como para la concentración de cobre lixiviado, hierro ferroso y férrico en pruebas de biolixiviación y lixiviación química, se realizó un estudio estadístico mediante ANOVA, de dos factores, para examinar el efecto de los parámetros significativos al 95% y 99% de confianza.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del mineral

A partir de los diagramas de difracción de rayos X presentados en la Fig. 3, se pudo comprobar que la muestra es una arenisca cuarzosa que presenta al

cobre en forma de cuprita con una mineralización de 5% de pirita (FeS_2) y 6% de sulfuro de hierro (FeS), además de compuestos oxidados con 11% cuprita (Cu_2O); 3% de magnetita (Fe_3O_4) y 73% de cuarzo (SiO_2).

3.2. Efecto del pH en la lixiviación química

Inicialmente, en la columna de lixiviación química, el pH del medio lixivante se regula a $\text{pH}=1,8$. Después de 4 días de operación el pH era superior a 2. Para bajar y regular el pH a 1,8 se agregó H_2SO_4 a las columnas de lixiviación, con un consumo total de 153,5 mL de H_2SO_4 a los 4; 8; 12; 16 y 20 días. En la lixiviación del mineral de menor tamaño (9,5 mm) la variación de pH exigió, a los 8 días, un consumo de 20,5 mL de H_2SO_4 que fue de 18,5 mL para el mineral de tamaño de grano igual a 12,5 mm y de 21 mL en el caso del tamaño de 19,05 mm (Tabla 1).

3.3. Efectos del tamaño de partícula en biolixiviación y lixiviación química

En la Fig. 4, se muestran de manera comparativa los promedios de la concentración de Fe^{2+} , Fe^{+3} y Fe_{TOTAL} (expresados en mgL^{-1}). Se observa que los mayores valores, basados en resultados del ANOVA ($p < 0,05$), se observan en los procesos de biolixiviación, suponiendo que son adecuados para la recuperación del cobre.

La cantidad de metal oxidado en el proceso aumenta con el incremento de la concentración

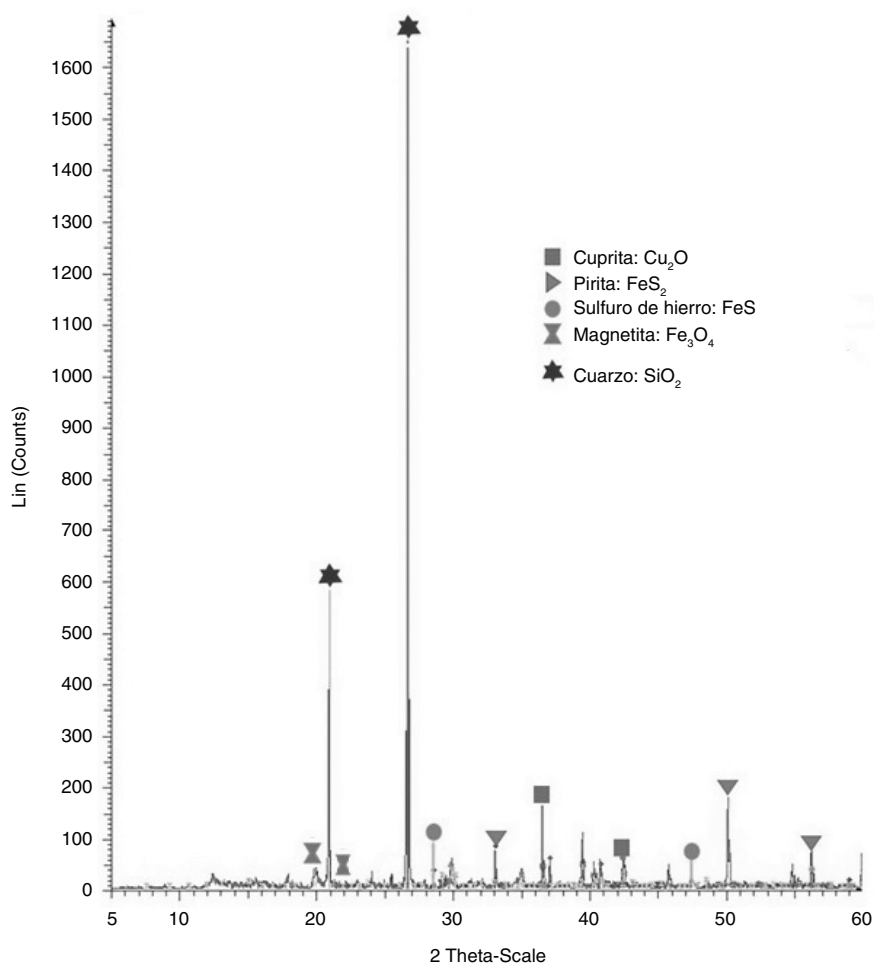


FIGURA 3. Difractograma DRX de la muestra del mineral cuarzo.

inicial de Fe^{+2} en la solución. El cociente $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ varía en función de los tamaños de partículas, siendo mayor en el tamaño de 19,05 mm en sistemas de biolixiviación y lixiviación química (ver Tabla 2).

La biolixiviación y la lixiviación química del mineral cuarzo, ha sido ensayado utilizando diferentes tamaños de partículas (9,5 mm; 12,5 mm y 19,05 mm) durante 24 días en reactores de columnas (Tabla 3). La producción de hierro férrico en 24 días para partículas de tamaño de 19,05 mm ayuda a la penetración incrementada del agente lixivante, dando como resultado una recuperación del cobre del 86% para la biolixiviación y del 54% para la lixiviación química.

Según Fowler y Crundwell (1998), el hierro juega un papel clave en la biolixiviación de minerales sulfurados. El hierro férrico de los minerales genera cobre y hierro ferroso disueltos. El hierro ferroso como fuente de energía en la biolixiviación de microorganismos se oxida para regenerar el hierro férrico, donde en la etapa final de la biolixiviación, la disolución de los minerales, se puede inhibir por

el aumento de la concentración de hierro férrico, cuando la superficie está cubierta con sustancias de pasivación como la jarosita, formada por la continua oxidación de los microorganismos (Zhou *et al.*, 2009).

En la Fig. 5 se muestra el crecimiento de células en diferentes tamaños de partículas, observándose un incremento en el número de células de *A. ferrooxidans* en el menor tamaño del mineral cuarzo con un promedio de 3×10^8 células. mL^{-1} , en concordancia con los resultados ANOVA ($p < 0,05$ significancia) a los 4, 8 y 16 días y ($p < 0,01$ mayor significancia) a los 12, 20 y 24 días.

La influencia del pH en cada columna de biolixiviación con *A. ferrooxidans*, sobre el tamaño del mineral cuarzo, resultó que el pH más elevado se alcanzó con el mayor tamaño del mineral 19,05 mm (pH=1,43); seguido de 12,5 mm con un pH=1,36, y el pH más bajo se registró en el tamaño de 9,5 mm (pH = 1,16); los resultados se muestran en la Fig. 6a.

En la biolixiviación en columna con el tamaño de partícula 9,5 mm, se recuperó el 86% de cobre,

TABLA 1. Variación del pH durante la lixiviación química y del consumo de ácido sulfúrico (CAS) (expresado en mL) a diferentes tiempos de reacción (expresados en días)

Tamaño (mm)	4 días		8 días		12 días		16 días		20 días		24 días	
	pH	CAS	pH	CAS	pH	CAS	pH	CAS	pH	CAS	pH	CAS
9,5 r1	4,1	6	4,4	7	2,4	4	2	1	2,1	1	2	-
9,5 r2	2,7	4	3,5	6,5	2,4	4	2,1	1	2,2	1	1,7	-
9,5 r3	2,9	4	3,6	7	2,3	3	2,1	1	2,3	1	2	-
TOTAL ^a		14		20,5		11		3		3		0
12,5 r1	1,3	-	3,6	6,5	2,3	3	1,9	3	2	1	2,1	-
12,5 r2	1,8	-	3,4	6	2,3	4	2,1	3	2,1	1	2,1	-
12,5 r3	3,8	6,5	3,8	6	2,4	4	2,2	3	2,1	1	2,1	-
TOTAL ^b		6,5		18,5		11		9		3		0
19,05 r1	2,6	4	3,3	7	2,4	4	2,2	3	2,2	1	2,1	-
19,05 r2	3	4	3,8	7	2,4	4	2,1	2,1	1	2	-	-
19,05 r3	4	6	4	7	2,3	4	2	1	2,2	1	2	-
TOTAL ^c		14		21		12		4		3		0
CAS TOTAL		34,5		60		34		16		9		0

TOTAL^a (Consumo total de ácido sulfúrico) por tamaño de partícula de 9,5 mm a diferentes tiempos.TOTAL^b (Consumo total de ácido sulfúrico) por tamaño de partícula de 12,5 mm a diferentes tiempos.TOTAL^c (Consumo total de ácido sulfúrico) por tamaño de partícula de 19,05 mm a diferentes tiempos.

CAS TOTAL (Consumo total de ácido sulfúrico) a diferentes tiempos r1: réplica 1; r2: réplica 2; r3: réplica 3.

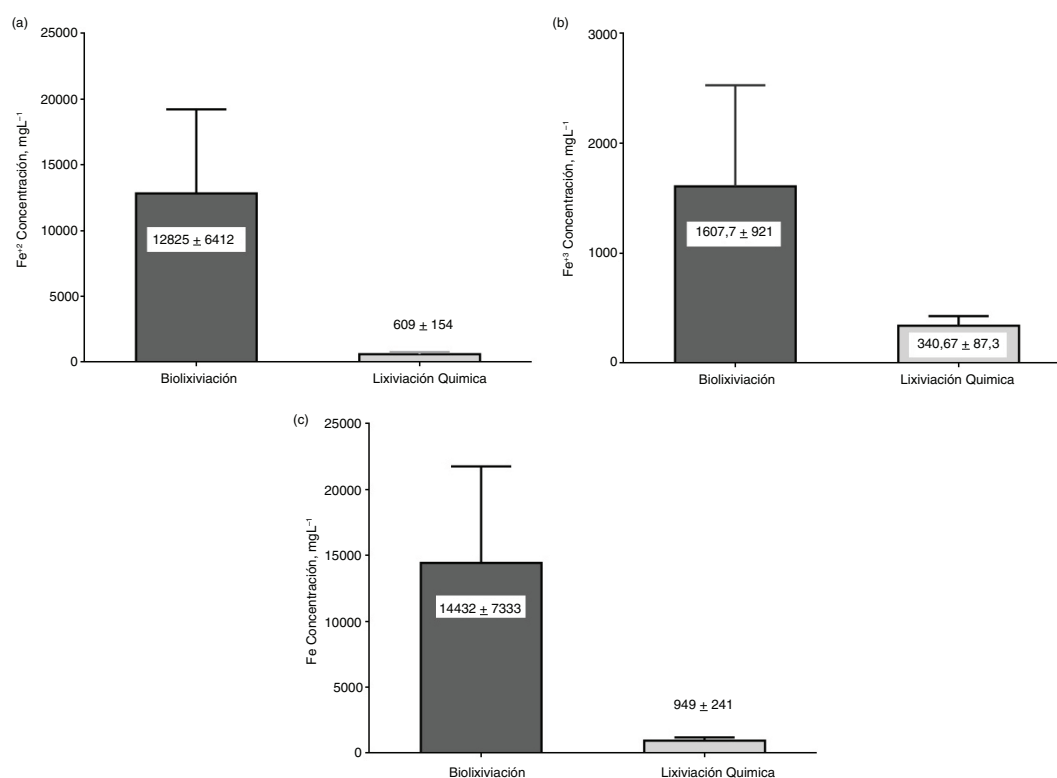


FIGURA 4. Comparación del grado de oxidación del Fe^{+2} a Fe^{+3} en procesos de biolixiviación y lixiviación química: a) Concentración de Fe^{+2} (mgL^{-1}), b) Concentración de Fe^{+3} (mgL^{-1}), y c) Concentración de Fe total (mgL^{-1}).

TABLA 2. Variación de las concentraciones de hierro total Fe (gL^{-1}) y relación $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ en sistemas de columnas de biolixiviación y lixiviación química en función del tamaño de partícula del mineral

Tamaño (mm)	Biolixiviación		Lixiviación Química	
	Fe (gL^{-1})	$[\text{Fe}^{+3}]/[\text{Fe}^{+2}]$	Fe (gL^{-1})	$\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$
9,5	8,06	0,07	1,21	0,63
12,5	17,8	0,1	0,66	0,66
19,05	28,4	0,11	0,98	0,6

TABLA 3. Variación de las concentraciones promedio de Fe^{+3} y Fe^{+2} en función de los tamaños de partículas en los procesos de biolixiviación (BioLix) y lixiviación química (LQ) estudiados

Tamaño	Fe^{+2} (gL^{-1})			Fe^{+3} (gL^{-1})		
	9,5 mm	12,5 mm	19,05 mm	9,5 mm	12,5 mm	19,05 mm
BioLix	7,6	16,87	25,7	0,53	1,6	2,7
LQ	0,73	0,4	0,7	0,5	0,53	1

representando la condición oxidante más fuerte que claramente se refleja por la evaluación del potencial redox con altos valores a los 24 días (Fig. 7a), corroborando el promedio de la alta población de bacterias ($3,4 \times 10^8$ cel mL^{-1}) comparado con ($1,4 \times 10^8$ cel mL^{-1}) y ($2,4 \times 10^8$ cel mL^{-1}) en tamaños de partícula de 12,5 mm y 19,05 mm respectivamente, con diferencias significativas a los 8, 12, 16 y 20 días. En comparación a la biolixiviación por percolación, se recuperó el 27% cobre a los 80 días, en mineral de bajo grado con

el tamaño de partícula de 8 mm (Rao *et al.*, 2008).

En la Fig. 7, se muestra el incremento de los valores del potencial redox de 4 a 24 días, aumentando de 314 a 576,3 mV (Fig. 7a) con el menor tamaño del mineral con la mayor recuperación de cobre, indicando una buena actividad bacteriana y una biolixiviación eficiente según Franzmann *et al.* (2005).

En la Fig. 7b, (lixiviación química) se muestra un aumento de potencial redox de 210 a 543 mV,

alcanzando una eficiente recuperación de cobre por el mayor consumo de ácido sulfúrico. Según Yu *et al.* (2011) y Zhao *et al.* (2015) el potencial redox en la solución de lixiviación afecta significativamente al comportamiento electroquímico de los minerales que contienen cobre e incluso influyen en su disolución, cuando el potencial redox se mantiene en un determinado intervalo.

En la Fig. 8a se muestra la mayor concentración de cobre en la solución lixivante en los procesos de biolixiviación. En la Fig 8b, se muestra la mayor concentración de cobre con el menor tamaño de partícula, seguido de 12,5 mm y 19,05 mm. Por lo tanto, el proceso de biolixiviación puede verse afectado de manera significativa por el tamaño de partícula, a través de su zona de contacto partícula-solución lixivante

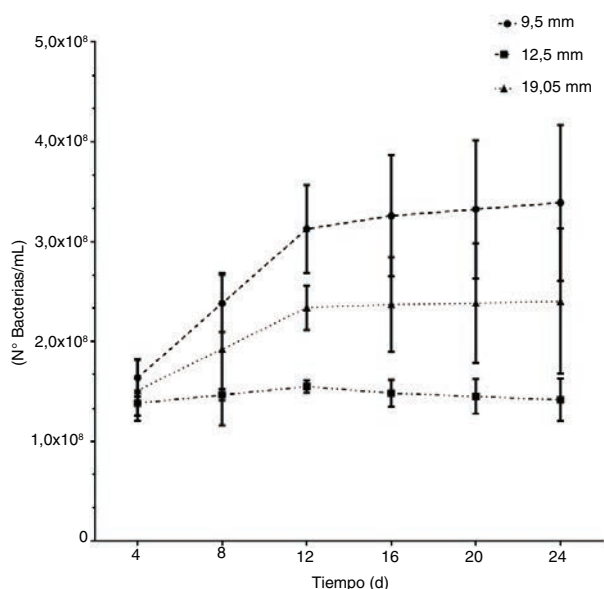


FIGURA 5. Efecto del tamaño del mineral de baja ley de cobre en el crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans*

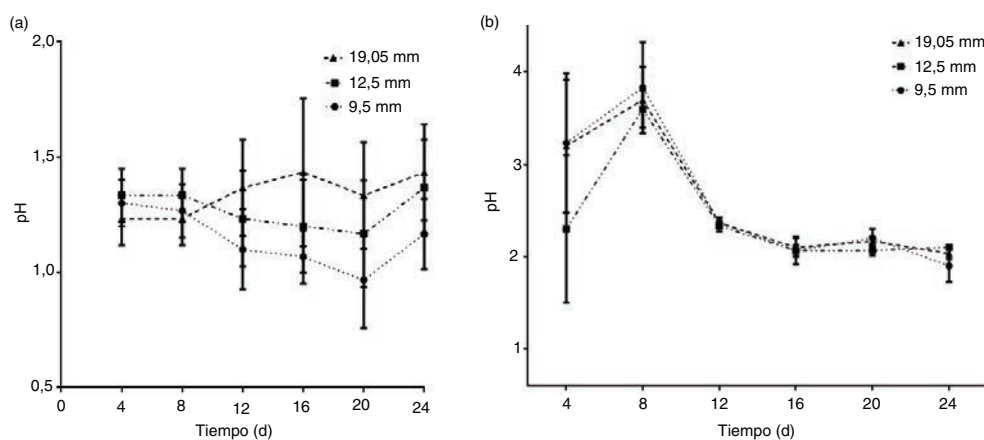


FIGURA 6. Variación del pH en sistema de reactores de columnas a diferentes tamaños de partículas: a) biolixiviación, y b) lixiviación química.

(Fagan *et al.*, 2013), así como por las interacciones partículas - microorganismos (Kathryn *et al.*, 2008; Mohapatra *et al.*, 2012).

En el presente estudio, se recuperó el 54% de cobre del mineral cuarzo en la lixiviación química (Fig. 9) (en comparación a estudios de lixiviación química a partir de concentrados polimetálicos se recuperó el 86,63% de cobre, según Patel *et al.* (2014)). A los 24 días de la biolixiviación con *A. ferrooxidans* se recuperó el 86% de cobre, con el menor tamaño de partícula en mineral cuarzo mostrado frente a una extracción del 54% de cobre (Mo *et al.*, 2011) obtenida en biolixiviación de calcopirita con la adición de 50 gL⁻¹ de cuarzo con tamaño de partícula de 43 μm. En otro estudio sobre efectos de la adición de cuarzo en la biolixiviación de calcopirita en frascos de agitación, después de 32 días de lixiviación, las extracciones de cobre a concentraciones de cuarzo (con tamaño de partícula de 43 μm) 0 gL⁻¹, 25 gL⁻¹, 50 gL⁻¹, 75 gL⁻¹ y 100 gL⁻¹ fueron de 37%, 42%, 54%, 18% y 22% respectivamente, demostrando que 50 gL⁻¹ de cuarzo fue la concentración más favorable para aumentar la tasa de lixiviación de cobre (Dong *et al.*, 2013). Estos resultados muestran que la adición de partículas micrométricas de cuarzo (43 μm aproximadamente) mejora la biolixiviación de la calcopirita, no reportándose trabajos de biolixiviación en minerales de cobre cuarcífero para la extracción del metal.

3.4. Disolución del mineral en biolixiviación y lixiviación química

El mineral de cuarzo usado para la biolixiviación y lixiviación química analizado por DR-X contenía principalmente cuprita, pirita y magnetita; mencionando a continuación los posibles mecanismos de disolución del mineral.

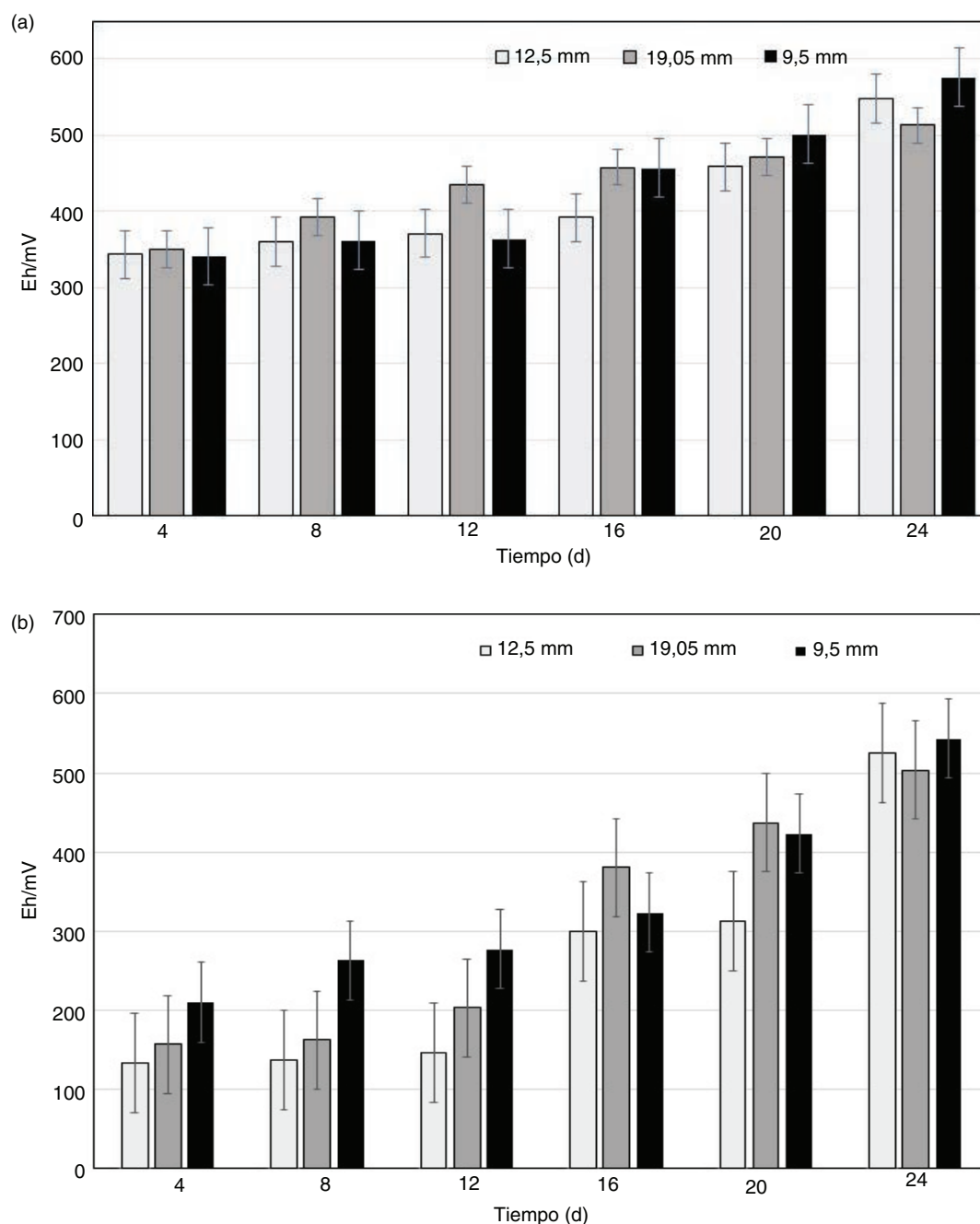


FIGURA 7. Variación del potencial redox en reactores de columnas a diferentes tamaños de partículas: a) biolixiviación, y b) lixiviación química.

En el presente trabajo, en la biolixiviación se recuperó el 86% del cobre en 24 días frente a una recuperación del 54% de cobre en la lixiviación química. De acuerdo con los resultados experimentales y las evaluaciones de ANOVA ($p < 0,01$) la biolixiviación es adecuada para una mayor recuperación del cobre en el menor tamaño de grano del mineral.

En la eficiencia de los procesos de lixiviación, la disolución ácida de la cuprita, sobre todo en el

mineral de menor tamaño de grano estudiado, juega un papel preponderante. En el caso de la biolixiviación, la oxidación de la cuprita fue mayor que en la lixiviación química.

En lo que se refiere a biolixiviación utilizando un reactor de columna, la disolución del mineral fue $7 \pm 0,1 \text{ gL}^{-1}$ de cobre produciendo $0,53 \pm 0,05 \text{ gL}^{-1}$ a través de la formación de tiosulfatos, formación favorecida por *A. ferrooxidans* (Schippers y Sand, 1999) (reacción 1), seguida

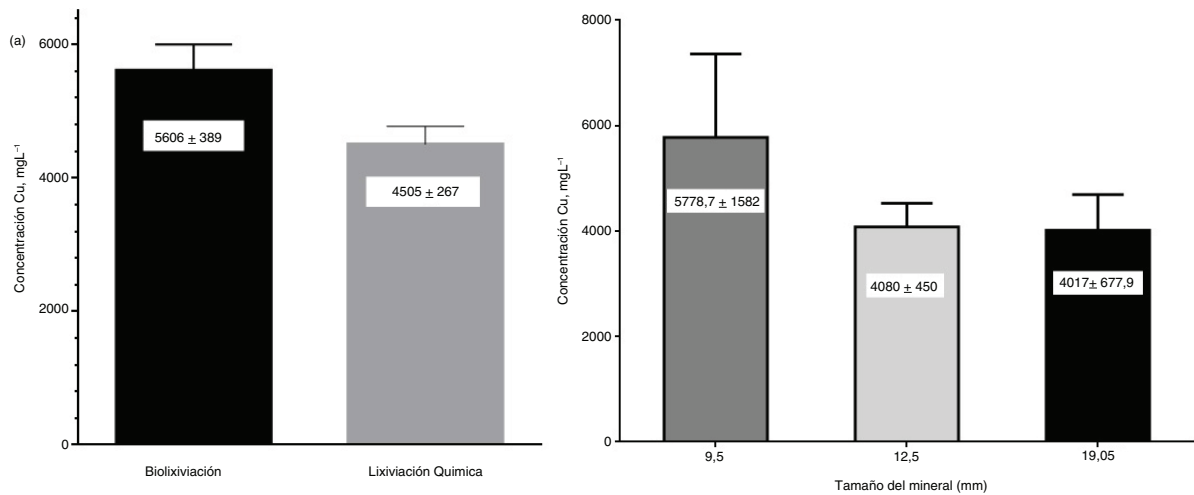


FIGURA 8. Comparación de las concentraciones de cobre en la solución lixivante: a) en función del proceso de biolixiviación y lixivitación química, y b) en función al tamaño de partícula del mineral de cuarzo.

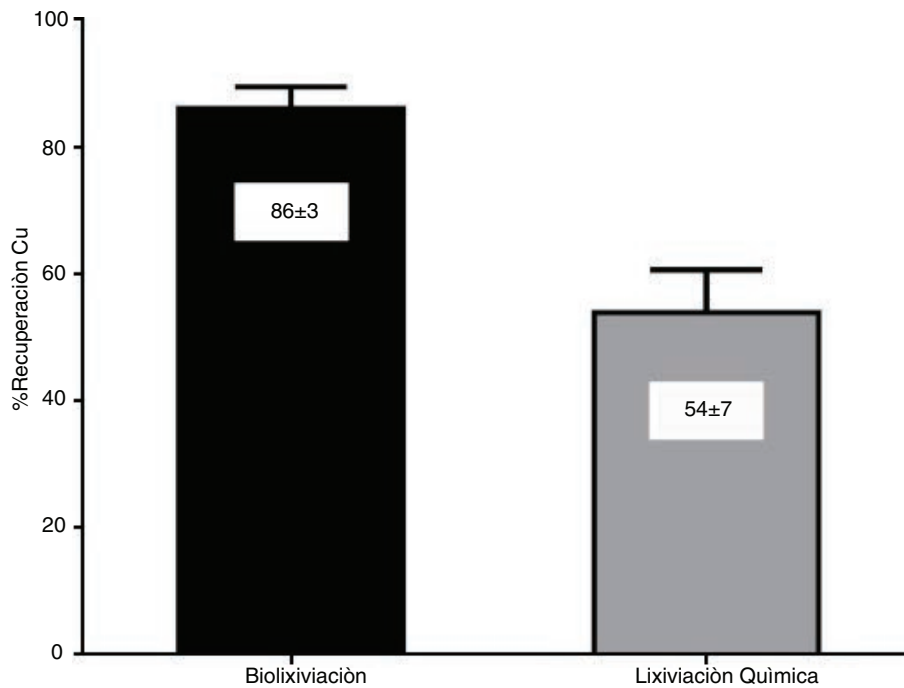


FIGURA 9. Recuperación comparativa de cobre en los procesos de biolixiviación y lixivitación química.

de una reacción de desproporción de Cu en Cu⁺² y Cu⁰ o cobre metálico (reacciones 2 y 3) proveniente de la cuprita (Cu₂O) solubilizando, sólo la mitad del cobre, mientras que la otra mitad se convierte en cobre metálico que posteriormente se somete a disolución en presencia de oxígeno (ver Fig. 11a) (Bustos *et al.*, 2004). No se conoce con tanto detalle el mecanismo de bioextracción

del cobre. Algunos autores consideran un proceso directo con participación de microorganismos, mientras que otros consideran principalmente el mecanismo químico indirecto (Silverman, 1967; Leduc y Ferroni, 1994; Fowler y Crundwell, 1998). Según Schippers y Sand (1999) el proceso de lixivitación está dominado por el mecanismo químico.

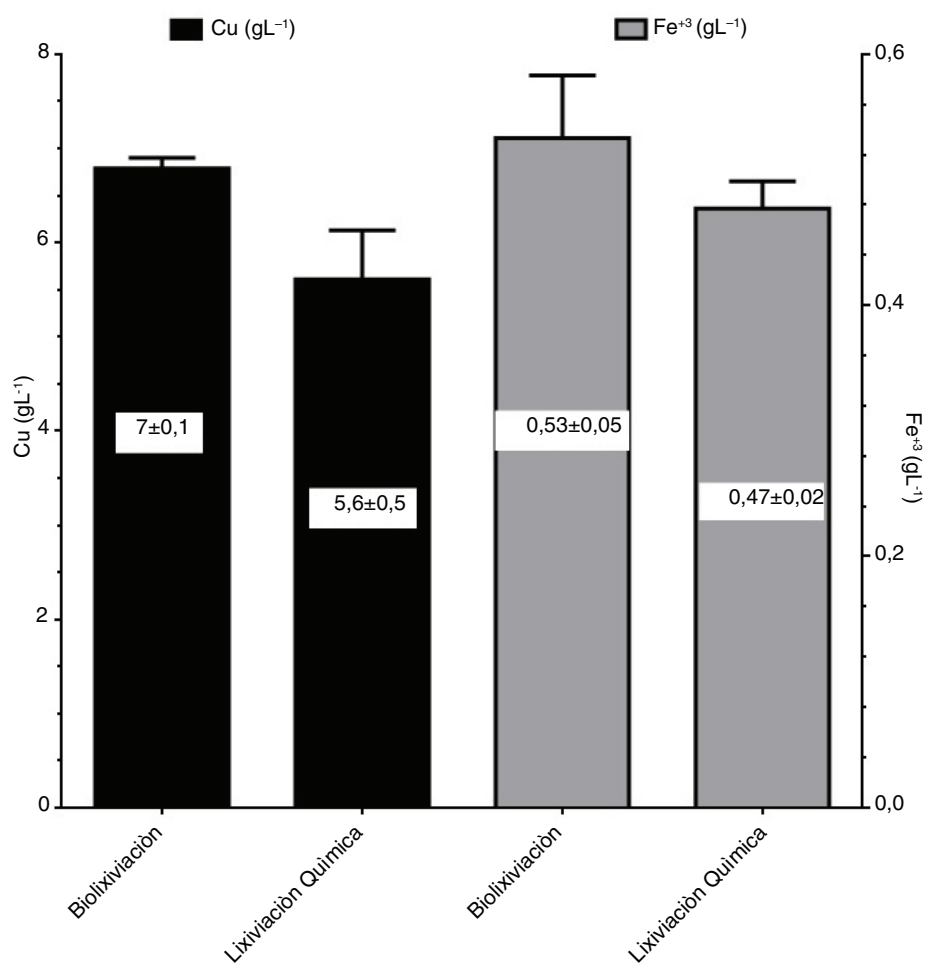


FIGURA 10. Disolución de cobre y generación de hierro férrico en reactor de columna en procesos de biolixiviación y lixiviación química.

La disolución del mineral en la lixiviación química en reactor de columna fue $5,6 \pm 0,5 \text{ gL}^{-1}$ de cobre generando $0,47 \pm 0,02 \text{ gL}^{-1}$ de hierro férrico mostrado (Fig. 10), procedente de la disolución de la pirita en el ácido sulfúrico, produciendo sulfato férrico (reacción 1') (Fig. 11b). La disolución de la cuprita en la lixiviación química produce cobre (Cu^0) y sulfato de cobre (CuSO_4) (reacción 2' y 3') (Fig. 11b). Por tanto, los minerales no sulfurados como el cobre nativo y la cuprita (Cu_2O), requieren, para solubilizar el cobre, de procesos de oxidación, (Bartlett, 2013).

En la Fig. 11, se esquematiza la disolución de óxidos de cobre en la biolixiviación y lixiviación química en sistemas de columnas por gravedad. Según Bartlett (2013), este proceso es cinéticamente muy lento cuando la lixiviación se realiza por

ejemplo en vertederos, sin la presencia de bacterias para catalizar la reacción.

4. CONCLUSIONES

La biolixiviación en un reactor de columna con *A. ferrooxidans* con un crecimiento de $1,64 \times 10^8$ a $3,39 \times 10^8 \text{ cel.mL}^{-1}$ en un periodo de 24 días en los minerales cuarzo con el menor tamaño de partícula (9,5 mm) procedente de una mina de la región Arequipa, Perú, permite recuperar el 86% de cobre con la suficiente cantidad de hierro férrico ($0,53 \pm 0,05 \text{ gL}^{-1}$). En comparación, la lixiviación química permitió recuperar el 54% de cobre con hierro férrico ($0,47 \pm 0,02 \text{ gL}^{-1}$), con un considerable consumo de ácido sulfúrico. El cuarzo mejora la recuperación del cobre en minerales oxidados de baja ley ya que las impurezas eliminadas de éste ejercen un

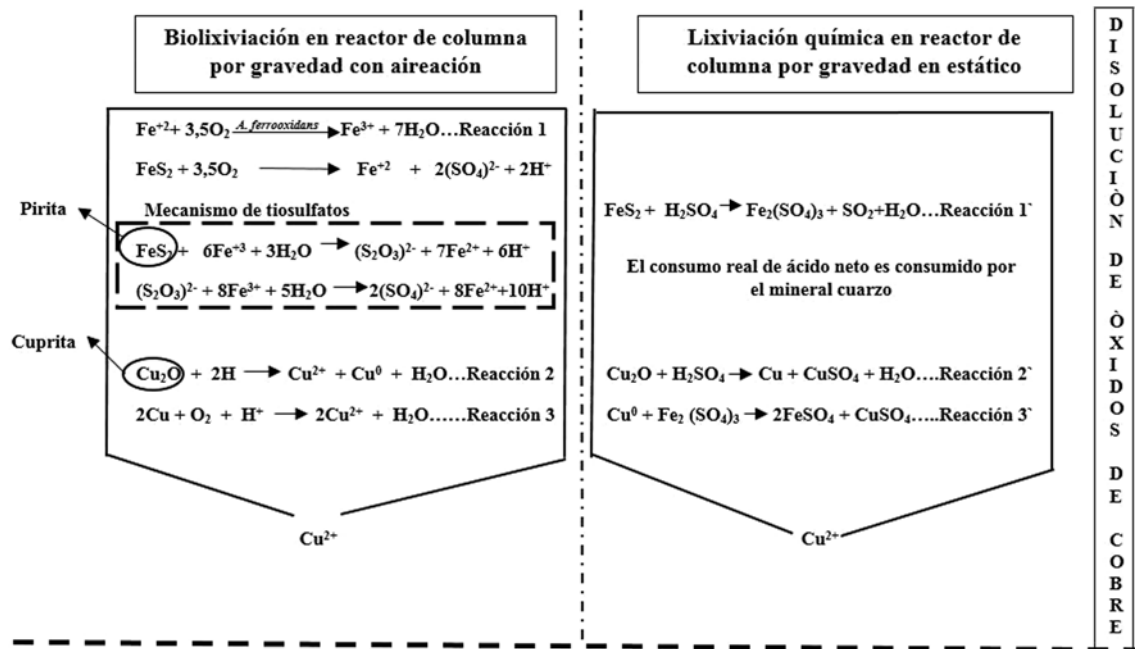


FIGURA 11. Representación esquemática de las posibles reacciones químicas de disolución de óxidos de cobre en la biolixiviación y lixiviación química en reactor de columnas.

efecto de abrasión de la capa de pasivación existente en la superficie del mineral.

AGRADECIMIENTOS

R. Huarachi-Olivera agradece a la Universidad de Antofagasta-Chile, por la beca de estudios del magister; al Fondo de Investigación para Tesis 2015 MEM. Así mismo se agradece a ATI15-02/ ATI15-03, proyecto semillero MEM 5302, de la Universidad de Antofagasta-Chile, y por la ayuda brindada a Dario Espinoza y al Dr. Jaime Llanos Silva, Jefe del Programa de Química de la Universidad Católica del Norte, Antofagasta-Chile.

REFERENCIAS

- Bartlett, R. (2013). *Solution mining, leaching and fluid recovery of materials*, Second Ed., Taylor & Francis, p. 470.
- Bustos, S., Casas, J.M., Gonzalez, C. (2004). Acid requirements in bacterial heap leaching of copper sulphide ores. *Hydro-sulphides*, 187–196.
- Dong, Y.B., Lin, H., Zhou, S., Xu, X., Zhang, Y. (2013). Effects of quartz addition on chalcopyrite bioleaching in shaking flasks. *Miner. Eng.* 46–47, 177–179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.014>.
- Fagan, M.A., Sederman, A.J., Harrison, S.T.L., Johns, M.L. (2013). Phase distribution identification in the column leaching of low grade ores using MRI. *Miner. Eng.* 48, 94–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.005>.
- Fowler, T.A., Crundwell, F.K. (1998). Leaching of Zinc Sulfide by *Thiobacillus ferrooxidans*. experiments with a controlled redox potential indicate no direct bacterial mechanism. *Appl. Environ. Microbiol.* 64 (10), 3570–3575.
- Franzmann, P., Haddad, C., Hawkes, R., Robertson, W., Plumb, J. (2005). Effects of temperature on the rates of iron and sulfur oxidation by selected bioleaching Bacteria and Archaea: application of the Ratkowsky equation. *Miner. Eng.* 18 (13–14), 1304–1314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2005.04.006>.
- Hariprasad, D., Mohapatra, M., Anand, S. (2013). Sulphuric acid leaching of low/medium grade manganese ores using a novel nitrogenous reductant-NH₃NH₂H₂SO₄. *J. Min. Metall. B* 49 (1), 97–106. <http://dx.doi.org/10.2298/JMMB120806024H>.
- Hedrich, S., Guézennec, A. G., Charron, M., Schippers, A., Joulian, C. (2016). Quantitative monitoring of microbial species during bioleaching of a copper concentrate. *Frontiers in Microbiology*, 7.
- Kathryn, W., Hannele, A., Barrie, J.D. (2008). Microbiological and geochemical dynamics in simulated-heap leaching of a polymetallic sulfide ore. *Biotechnol. Bioeng.* 101 (4), 739–750. <http://dx.doi.org/10.1002/bit.21951>.
- Kodali, P., Dhawan, N., Depci, T., Lin, C.L., Mille, J.D. (2011). Particle damage and exposure analysis in HPGR crushing of selected copper ores for column leaching. *Miner. Eng.* 24 (13), 1478–1487. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.07.010>.
- Leduc, L.G., Ferroni, G.D. (1994). The chemolithotrophic bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*. *FEMS Microbiol. Rev.* 14 (2), 103–119. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6976.1994.tb00082.x>.
- Mo, X.L., Lin, H., Dong, Y.B., Xu, C.Y. (2011). Effect of quartz on bioleaching of chalcopyrite. *J. Univ. Sci. Technol. Beijing* 33 (6), 682–687.
- Mohapatra, B.K., Singh, S., Sukla, L.B., Rao, K.S., Mishra, B.K. (2012). Study on surface alteration behavior during column bioleaching. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 33 (6), 374–390. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2011.601699>.
- Panda, S., Sanjay, K., Sukla, L.B., Pradhan, N., Subbaiah, T., Mishra, B.K., Prasad, M.S.R., Ray, S.K. (2012). Insights into heap bioleaching of low grade chalcopyrite ores – A pilot scale study. *Hydrometallurgy* 125–126, 157–165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.06.006>.
- Patel, B.C., Tipre, D.R., Dave, S.R. (2012). Development of *Leptospirillum ferriphilum* dominated consortium for ferric

- iron regeneration and metal bioleaching under extreme stresses. *Bioresour. Technol.* 118, 483–489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.094>.
- Patel, B.C., Sinha, M.K., Tipre, D.R., Pillai, A., Dave, S.R. (2014). A novel biphasic leaching approach for the recovery of Cu and Zn from polymetallic bulk concentrate. *Bioresour. Technol.* 157, 310–315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.101>.
- Rao, K.S., Mishra, A., Pradhan, D., Chaudhury, G.R., Mohapatra, B.K., Das, T., Bihari Sukla, L.B., Mishra, B.K. (2008). Percolation bacterial leaching of low-grade chalcopyrite using acidophilic microorganisms. *Korean J. Chem. Eng.* 25 (3), 524–530. <http://dx.doi.org/10.1016/10.1007/s11814-008-0088-0>.
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., Sand, W. (2003). Bioleaching review Part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 63 (3), 239–248. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-003-1448-7>.
- Sánchez, J.R.B., Bello, R.M. (2009). *Traducción y censura: el manual de química de Jean-Antoine Chaptal (1756-1832)*. Cuadernos del Instituto de Historia de la Lengua, Ed. Cilengua, España, pp. 27–61.
- Schippers, A., Sand, W. (1999). Bacterial leaching of metal sulfides Proceeds by two indirect mechanisms via Thio-sulphate or via Polysulphides and sulfur. *Appl. Environ. Microbiol.* 65 (1), 319–321.
- Schnell, H.A. (1997). *Bioleaching of copper*. In *Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes*. Eds. D.E. Rawling, Springer Verlag, Berlin, pp. 21–43.
- Silverman, M.P. (1967). Mechanism of bacterial pyrite oxidation. *J. Bacteriol.* 94 (4), 1046–1051.
- Styriaková, I., Bhatti, T.M., Bigham, J.M., Styriak, I., Vuorinen, A., Tuovinen, O.H. (2004). Weathering of phlogopite by *Bacillus cereus* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Can. J. Microbiol.* 50 (3), 213–219. <http://dx.doi.org/10.1139/w04-003>.
- Tipre, D.R., Dave, S.R. (2004). Bioleaching process for Cu-Pb-Zn bulk concentrate at high pulp density. *Hydrometallurgy.* 75 (1-4), 37–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.06.002>.
- Vogel, A.I. (1961). *Text-book of quantitative inorganic analysis, including elementary instrumental analysis*, Ed. John Wiley & Sons, USA.
- Wang, J., Qin, W.Q., Zhang, Y.S., Yang, C.R., Zhang, J.W., Nai, S.S., Qiu, G.Z. (2008). Bacterial leaching of chalcopyrite and bornite with native bioleaching microorganism. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 18 (6), 1468–1472. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60027-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60027-3).
- Wu, A.X., Yin, S.H., Wang, H.J., Qin, W.Q., Qin, G.Z. (2009). Technological assessment of a mining-waste dump at the Dexing copper mine, China, for possible conversion to an in situ bioleaching operation. *Bioresour. Technol.* 100 (6), 1931–1936. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.021>.
- Xiaolan, M., Hai, L., Jiankang, W., Chengyan, X. (2013). Effect of Gangue Minerals on Chalcopyrite Bioleaching. *Chinese Journal of Rare Metals* 3, 019. <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.0258-7076.2013.03.017>.
- Yu, R., Zhong, D., Miao, L., Wu, F., Qiu, G., Gu, G. (2011). Relationship and effect of redox potential, jarosites and extracellular polymeric substances in bioleaching chalcopyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 21 (7): 1634–1640. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60907-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60907-2).
- Zhao, H., Wang, J., Qin, W., Hu, M., Zhu, S., Qiu, G. (2015). Electrochemical dissolution process of chalcopyrite in the presence of mesophilic microorganisms. *Miner. Eng.* 71, 159–169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.025>.
- Zhou, H.B., Zeng, W.M., Yang, Z.F., Xie, Y.J., Qiu, G.Z. (2009). Bioleaching of chalcopyrite concentrate by a moderately thermophilic culture in a stirred tank reactor. *Bioresour. Tech.* 100 (2), 515–520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.033>.