

Influencia de los parámetros de agitación y aireación en la biooxidación de un mineral aurífero refractario

Katherine Jaramillo M.

Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, kijaramillo@utpl.edu.ec

Paulina Aguirre Ch.

Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, piaguirre@utpl.edu.ec

RESUMEN

La biooxidación de minerales sulfurados utilizando microorganismos nativos pretende aprovechar mejor los recursos naturales. Actualmente en minería se utiliza como pretratamiento de menas auríferas refractarias previo a la cianuración. Este mecanismo permite liberar el oro contenido en la matriz sulfurada, por acción de bacterias acidófilas que utilizan hierro y azufre como fuente de energía. El objetivo de este estudio fue determinar la influencia de agitación y aireación en la suspensión de sólidos con la finalidad de obtener la mejor solubilización del mineral. Los ensayos de suspensión de sólidos se realizaron variando el flujo de aire, la velocidad de agitación y la altura del rotor. Optimizadas estas variables, se iniciaron los ensayos de biooxidación, manteniendo constantes: temperatura (30°C), pH (1.8), tamaño de partícula (-200mallas) y densidad de pulpa (15%p/v). Se midió la concentración de Fe²⁺, Fe total, sulfatos y conteo microbiano, para determinar la solubilización del mineral y caracterizar la cinética de crecimiento microbiano durante 30 días. Los resultados mostraron que la mejor solubilización del mineral se obtiene a 400rpm de velocidad de agitación, 3vvm de aireación y 2.5cm de altura del rotor; obteniendo una productividad volumétrica de 0,435gr/Ld para hierro, 0,718g/Ld para sulfatos, una extracción de hierro de 80,16% y una recuperación de oro de 83.63%.

Palabras clave: biooxidación, bacterias acidófilas, suspensión de sólidos, productividad volumétrica

ABSTRACT

The biooxidation of sulfide ores using native microorganisms seeks to better use natural resources. Currently in mining, it is used as a pretreatment of refractory gold ores prior to cyanidation. This mechanism allows releasing the gold contained in the sulfurized matrix by means of acidophilic bacteria which use iron and sulfur as a source of energy. The objective of this study was to determine the influence of agitation and aeration on the solids suspension in order to obtain the best mineral solubilization. The tests of suspension of solids were carried out by varying the air flow, the agitation speed and the height of the impeller. After those variables were optimized, biooxidation tests started by maintaining constant temperature (30°C), pH (1.8), particle size (-200mesh) and pulp density (15%w/v). The concentration of Fe²⁺, Fe total, sulfates and microbial counting were measured to determine the mineral solubilization and to characterize the microbial growth kinetics during 30 days. The results showed that the best mineral solubilization is obtained at 400rpm of agitation speed, 3vvm of aeration and 2.5cm of height of the impeller; thus obtaining a volumetric productivity of 0,435g/Ld for iron, 0,718g/Ld for sulfates, iron extraction of 80,16% and gold recovery of 83,63%.

Key words: biooxidation, acidophilic bacteria, suspended solids, volumetric productivity

1. INTRODUCCIÓN

La biooxidación de minerales sulfurados de baja ley, utilizando microorganismos mesófilos es una

alternativa económicamente viable para la recuperación de algunos metales (Gordillo et al., 2009). En el Ecuador para la recuperación de oro no se realiza pretratamiento oxidante a las menas

refractarias, ni se ha implementado el proceso de biooxidación de minerales de baja ley o de oro refractario de manera comercial. Por tanto, se cree que ocurren grandes pérdidas de ellos, en especial en las minas menos tecnificadas (Muñoz et al., 2003). Es por esto, que la investigación en microbiología aplicada al sector minero-metalúrgico se vuelve importante como una herramienta biotecnológica para favorecer la recuperación de recursos naturales, además es considerada como una tecnología limpia, con mayor protección ambiental que las tecnologías convencionales. (Smith y Misra, 1991).

La biooxidación en reactores de tanque agitado es un método utilizado en el pre-tratamiento oxidante de menas refractarias específicamente, como una alternativa a los procesos de tostación y oxidación por presión (Ospina et al., 2012). La capacidad de las bacterias mesófilas *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, para catalizar compuestos reducidos de azufre e ion ferroso, está dada por su condición quimiolitotrofa, es decir, su fuente de energía la obtienen de compuestos inorgánicos, por lo tanto, ellas crecen a expensas de la liberación u obtención de electrones a partir de la oxidación de minerales (Gordillo et al., 2004). Este proceso es aprovechado en la minería aurífera para la oxidación de especies minerales, permitiendo así la liberación del oro ocluido en la estructura de algunos minerales, haciéndolo disponible para los procesos subsecuentes, como la lixiviación con cianuro (Ospina et al., 2012).

El sistema de reacción en la biooxidación en tanque agitado consta de tres fases: gaseosa, líquida y sólida, cada fase tiene un propósito fundamental (Arroyave, 2008; González et al., 2003). La fase gaseosa, suple la cantidad de oxígeno necesario para que los microorganismos oxiden los sulfuros. En la fase líquida se da el crecimiento microbiano, el enlace de las partículas sólidas con los microorganismos, distribución uniforme y efectiva de los nutrientes para la oxidación bacteriana. Y por último la fase sólida que es el mineral refractario que será solubilizado (Arroyave, 2008; González et al., 2003).

Con el fin de obtener un funcionamiento eficiente del reactor el contenido debe ser homogéneo, sin acumulación de sólidos, sin gradientes en la composición, pH, potencial redox y temperatura. Por lo que es importante cuidar condiciones de operación como la agitación y la aireación (Acevedo, 2000; González et al., 2003).

En el reactor la agitación genera una mezcla homogénea y aumenta la velocidad de transferencia de masa y calor dentro del mismo. Una adecuada velocidad de agitación da lugar al aumento de la productividad del proceso además que favorece la suspensión de sólidos, evitándola la precipitación de los mismos. Debe evitarse altas tasas de agitación para prevenir daño en la estructura celular (Alegre, 1997; González et al., 2003).

Una aireación adecuada debe proporcionar el oxígeno y dióxido de carbono requerido por la población microbiana. Se debe evitar las excesivas tasas de flujo que pueden conducir a inundaciones de rotores y causar altos costos de operación, lo que representa aproximadamente el 30 - 40% del consumo energético total del proceso (Alegre, 1997; González et al., 2003).

Es por ello que el objetivo de este estudio es determinar la influencia de la agitación y aireación en la suspensión de sólidos y su aplicación en la biooxidación de minerales refractarios de oro en un reactor de tanque agitado en un sistema batch con la finalidad de obtener la mejor solubilización del mineral.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ENSAYOS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

Los ensayos se realizaron en reactores de tanque agitado de acero inoxidable con 5 litros de capacidad. El biorreactor se equipó con un rotor, difusor de aire, cuatro deflectores y rebalse a una altura de 3 litros.

Con la finalidad de obtener la mayor cantidad de sólidos suspendidos se llevó a cabo un diseño experimental compuesto central, en el que se varió la velocidad de agitación, el flujo de aire y la altura de rotor desde el fondo del tanque de acuerdo a la Tabla 1.

El volumen efectivo de trabajo del biorreactor fue de 3 litros con una densidad de pulpa al 15% p/v de sólidos y un tamaño de partícula 180-200 mallas. El tiempo utilizado para cada ensayo fue de 30 minutos, en este periodo se recogió los sólidos obtenidos del rebalse, se midió el volumen total de mezcla obtenida y a través de la técnica de peso seco se cuantificó la cantidad de sólidos presentes. Para la determinación de los sólidos suspendidos totales se tomó una muestra de 100 ml del interior del reactor y se realizó el mismo procedimiento.

Tabla 1: Diseño experimental

	Flujo de aire (vvm)	Velocidad de agitación (rpm)	Altura del rotor desde el fondo del tanque (cm)
1	-1 (1)	-1 (400)	-1 (2.5)
2	1 (3)	-1	-1
3	-1	1 (800)	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1 (4.5)
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	$-\alpha$ (0.3)	0 (600)	0 (3.5)
10	α (3.7)	0	0
11	0 (2)	$-\alpha$ (300)	0
12	0	α (900)	0
13	0	0	$-\alpha$ (2)
14	0	0	α (5)
15	0	0	0

2.2. ENSAYOS DE BIOOXIDACIÓN

Para el proceso de biooxidación se utilizó un consorcio microbiano (*Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*), aislados de drenajes ácidos de minas del distrito Portovelo. El mineral utilizado posee un 5% de sulfuros y una ley de cabeza de oro de 3,22 Kg/Ton.

Los ensayos de biooxidación se llevaron a cabo en un sistema batch en un reactor de tanque agitado de 5 litros con 3 litros de volumen de trabajo (medio 9K modificado + mineral aurífero refractario + 2% de ión ferroso). El medio de cultivo tuvo una densidad de pulpa de 15% (p/v) y un tamaño de partícula de 180-200 mallas. Las mejores condiciones de trabajo: velocidad de agitación, flujo de aireación y altura del rotor, se establecieron en los ensayos de suspensión de sólidos, además se operó con 10% de inóculo, pH de 1.8 y temperatura de 30°C. Se determinó la solubilización de mineral y la cinética de crecimiento microbiano durante 30 días; se controló periódicamente pH, Eh, y se midió la concentración de Fe^{2+} , Fe total por el método de Muir y Andersen (1977) y sulfatos por turbidimetría (González, 1999).

2.3. ENSAYOS DE CIANURACIÓN

El mineral biooxidado se sometió a un proceso de cianuración para cuantificar la recuperación de oro. La lixiviación se realizó utilizando 33% de sólidos en un tiempo de 13 horas, se determinó cianuro libre y mediante análisis de absorción atómica el oro presente en solución.

3. RESULTADOS

3.1. ESTUDIO DE LA SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS

La suspensión de sólidos depende de la densidad de pulpa, el tamaño de partícula, el diseño del rotor así como su tamaño, número y ubicación dentro del reactor (González, 1999). Este estudio comprendió el análisis del efecto de la velocidad de agitación, el flujo de aire y la altura del rotor desde el fondo del tanque en la concentración de sólidos en el rebalse y los sólidos totales del interior del reactor.

En la figura 1 y 2 se muestra la superficie de respuesta para la concentración de sólidos en el rebalse y la concentración de sólidos totales en el interior del reactor, respectivamente. Estas nos muestran que existen valores óptimos que maximizan la suspensión de sólidos cuando se combinan las tres variables, dando como mejor resultado en ambos casos la corrida N°2, con la codificación 1, -1, -1, lo que equivale a valores de 3 vvm de flujo de aire, 400 rpm de velocidad de agitación y 2.5cm de altura del rotor desde el fondo del tanque.

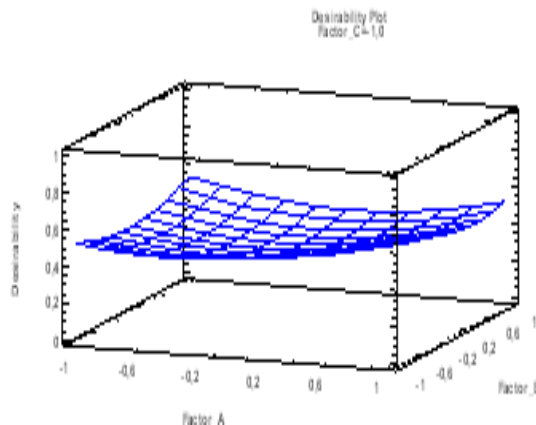


Figura 1: Concentración de sólidos del rebalse como una función de la posición del rotor (Factor C), la velocidad de agitación (Factor B) y flujo de aire (Factor A).

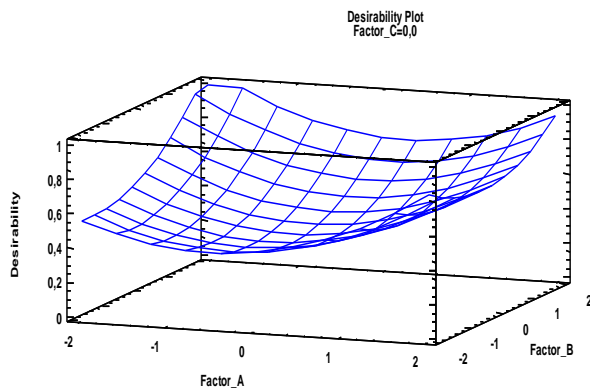


Figura 2: Concentración de sólidos totales suspendidos como una función de la posición del rotor (Factor C), la velocidad de agitación (Factor B) y flujo de aire (Factor A).

El valor óptimo obtenido de velocidad de agitación (400 rpm) está relacionado con el flujo axial o zona de bombeo y con el flujo radial o zona de recirculación. La zona de bombeo se ve favorecida con el incremento de la velocidad de agitación ya que existe una mayor suspensión de sólidos, mientras que a velocidades muy por encima del óptimo generan daños y estrés metabólico en las células además se refuerza la zona de recirculación dificultándose la suspensión de sólidos. (González, 1999; Toma et al., 1991)

La altura del rotor desde el fondo del tanque (2.5 cm), está relacionada directamente con el empuje de los sólidos, es decir los sólidos alcanzan una mayor altura, cuando el rotor se aleja, por otro lado el inconveniente generado es un mínimo levantamiento de los sólidos del fondo, afectando a la homogeneidad del sistema (González et al., 2003). Además el flujo de aire (3vvm) inyectado tuvo un efecto positivo en la suspensión de sólidos, especialmente para valores de velocidad bajos y cuando el rotor se encuentra cerca del fondo, debido a que la corriente de aire ascendente arrastra cierta cantidad de sólidos, ayudando al mezclado de sólidos en el fondo del tanque (González, 1999). Con escasa aireación el crecimiento celular disminuye (Alegre, 1997).

3.2. ENSAYOS DE BIOOXIDACIÓN

Los estudios de biooxidación se realizaron con los parámetros obtenidos en el análisis de suspensión de sólidos. Se determinó la solubilización del mineral, la cinética de crecimiento microbiano, la productividad

volumétrica y el porcentaje de extracción de hierro contenido en los sulfuros mineral presentes.

En la figura 3 se observa el crecimiento celular presentando un desarrollo exponencial desde los 7 días hasta 15 días aproximadamente, a partir esto tiende a mantenerse constante y a estabilizarse. En todas las fermentaciones se dan patrones similares que coinciden con las cinéticas de crecimiento bacteriano en cultivo batch. La mayor concentración celular (proteína total) coincide con el punto donde se obtiene el mayor porcentaje de células adheridas al mineral (proteína adherida) en un 97.27% (Alegre, 1997).

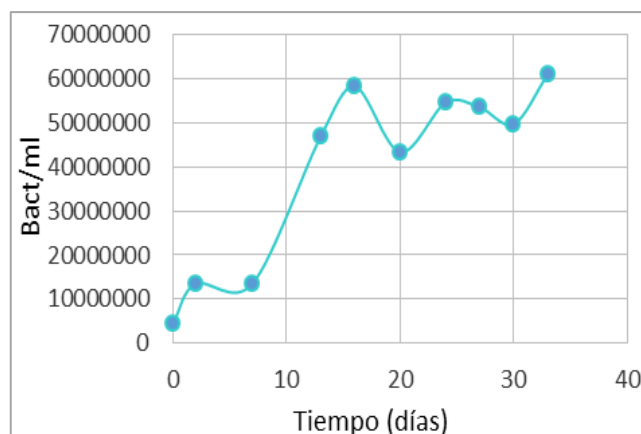


Figura 3: Cinética de crecimiento de la biooxidación en el sistema batch

De acuerdo a la figura 4, se pudo definir que la máxima concentración de hierro presente en solución, para un 15% p/v de densidad de pulpa, está alrededor de 15,52g/l en un tiempo de 30 días. Se determinó únicamente el hierro total en solución y no el precipitado en forma de jarositas. Estudios similares reportan concentraciones de hierro total en solución de 5,98 g/l en 10 días de biooxidación; a diferencia de este estudio, nuestro proceso tuvo una duración mayor, lo cual justifica el contraste en la concentración obtenida (Alegre, 1997; Arroyave, 2008).

La concentración de Fe^{3+} aumenta en el tiempo, mientras que el Fe^{2+} disminuye, debido a que el principal mecanismo catalítico de las bacterias consiste en la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} como se muestra en la figura 4, además se da la liberación de sulfatos por la ruptura de la estructura cristalina del sulfuro (Acevedo y Gentina, 2005; Williamson y Rimstidt, 1994).

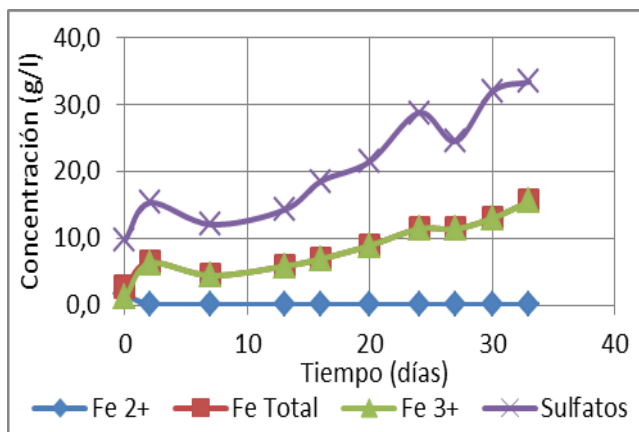


Figura 4: Concentración de hierro y sulfatos de mineral aurífero refractario de la biooxidación en el sistema batch

Los resultados de la Tabla 2 indican en forma general los valores de productividad, porcentaje de extracción, y rendimientos obtenidos al final del proceso de biooxidación, además de la velocidad de crecimiento celular máxima que se dio durante el proceso. Los resultados son satisfactorios con respecto a los obtenidos en matraces en condiciones similares de densidad de pulpa, tamaño de partícula, concentración de inóculo e inductor, lo cual permite deducir que la velocidad de agitación, flujo de aire y altura del rotor favorecen la solubilización del mineral (Aguirre et al., 2013).

Tabla 2: Determinación de parámetros para la solubilización de mineral

Productividad volumétrica de hierro - Q_p (g/l día)	0,435
Productividad volumétrica de sulfatos - Q_p (g/l día)	0,718
Porcentaje de extracción de hierro (%)	80,16
Rendimiento aparente de hierro en biomasa - $Y_{x/Fe}$ (g/g)	0,459
Velocidad de crecimiento máxima - μ_{max} (días ⁻¹)	0,119

3.3. ENSAYOS DE CIANURACIÓN

La Tabla 3 muestra el resultado obtenido de la recuperación de oro del proceso de cianuración luego

de la biooxidación, claramente después de biooxidar el mineral refractario, se puede recuperar hasta un 83,63% frente a un 68% de oro obtenido en matraces sin la aplicación de parámetros como agitación y aireación al sistema (Aguirre et al., 2013).

Tabla 3: Rendimiento de la recuperación de oro en el proceso de biooxidación

Peso Muestra (Kg)	0,30
Ley Au Cabeza (ppm)	3,22
Vol. Solución (l)	0,54
Ley Au Sol. (ppm)	1,50
Peso relave (Kg)	0,29
Ley Au relave (ppm)	0,62
Recuperación de Au (%)	83,63

4. CONCLUSIONES

La suspensión del mineral depende de la altura del rotor, flujo de aire y velocidad de agitación, valores óptimos mejoran la solubilización del mineral en el proceso de biooxidación, aumentando la productividad volumétrica de hierro y sulfatos (Q_p), así como la recuperación de oro después de la lixiviación con cianuro.

La mejor solubilización de mineral refractario se logró con 400 rpm de velocidad de agitación, 3vvm de flujo de aire y 2.5 cm de altura del rotor desde el fondo del tanque, con estas condiciones se obtuvo una productividad volumétrica de 0,4351 g/l día y 0,7184 g/l día para hierro y sulfatos respectivamente, con una recuperación de oro del 83,63%.

5. REFERENCIAS

- Acevedo, F. (2000). The use of reactors in biomining processes. *Electronic Journal of Biotechnology*, 3(3), 184-194.
- Acevedo, F. y Gentina, J. (2005). Mecanismos de la biolixiviación., *Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras* (págs. 7-22). Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso.
- Aguirre, P.; Díaz, E. y Gentina, J. (2013). Evaluation of parameters in the bio-oxidation process of

- refractory gold minerals. *Advanced Materials Research*, 825, 364-367
- Alegre, C. (1997). *Biooxidación de concentrados refractarios de oro en tanques agitados*. Tesis de Maestría en ciencias de la ingeniería con mención en ingeniería en bioquímica, Universidad católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- Arroyave, D. (2008). *Evaluación del proceso de biooxidación a escala de laboratorio del mineral aurífero de la mina el Zancudo, Titiribí, Antioquia*. Tesis de Maestría en Ingeniería de Materiales y Procesos, Universidad Nacional De Colombia, Medellín, Colombia.
- González, R. (1999). *Biooxidación de un mineral concentrado refractario de oro en sistema continuo*. Tesis de Maestría en ciencias de la ingeniería con mención en ingeniería en bioquímica, Universidad católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- González, R.; Gentina, J. y Acevedo, F. (2003). Optimisation of the solids suspension conditions in a continuous stirred tank reactor for the biooxidation of refractory gold concentrates. *Electric Journal of Biotechnology*, 6(3), 233-243.
- Gordillo, F.; Sanmartín, V.; Toracchi, E. y Carrión, F. (2004). Estudio de microorganismos nativos en procesos de biolixiviación de minerales auríferos refractarios. *III Congreso Internacional de Minería, Metalurgia y Materiales*.
- Gordillo, F.; Suárez, J.; Sanmartín, V.; Aguirre, P.; Gentina, J. y Donati, E. (2009). Mineralogical Characterization of a Polymetallic Concentrate Portovelo Mining District. Bioleaching by a Native Bacterial Consortium. *Advanced Materials Research*, (71-73), 481-484.
- Muir, M., y Andersen, T. (1977). Determination of ferrous iron in copper-process metallurgical solutions by the o-phenanthroline colorimetric method. *Metallurgical Transaction*, B(8), 517-518.
- Muñoz, A.; Márquez, M.; Montoya, O.; Ruiz, O. y Ilemehsko, V. (2003). Evaluación de oxidación bacteriana de sulfuros con *Acidithiobacillus ferrooxidans* mediante pruebas de FTIR y difracción de rayos X. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 5(1), 73-81.
- Ospina, J.; Mejía, E.; Osorno, L.; Márquez, M. y Morales, A. (2012). Biooxidación de concentrados de arsenopirita por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en erlenmeyer agitados. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 135-145.
- Smith, R. y Misra, M. (1991). *Mineral processing*. Nevada: TMS.
- Toma, M.; Ruklisha, M.; Vanags, J.; Zeltina, M.; Leite, M.; Galinina, N.; Viesturs, U. y Tengerdy, R. (1991). Inhibition of microbial growth and metabolism by excess turbulence. *Biotechnology and engineering*, 38, 552-556.
- Williamson M. y Rimstidt J. (1994). The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 58, 5443- 5454.