

Biooxidación de un mineral moncentrado de oro de Andacollo, Neuquén (Argentina)

Biooxidation of a gold concentrate ore from Andacollo, Neuquén (Argentina)

Gabriela Calegari¹,
Ricardo Ulloa^{1,2},
Alejandra Giaveno^{1,2},
Laura Lavalle^{1,2}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, (8300) Neuquén, Argentina.

² PROBIEN (CONICET-UNCo), Facultad de Ingeniería, Buenos Aires 1400, (8300) Neuquén, Argentina.
laura.lavalle@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

La biohidrometalurgia es una alternativa que ha crecido en interés y aplicaciones comerciales en las últimas décadas, por ser un proceso rentable, eficiente y biosustentable. Dentro de esta tecnología, se pueden tratar minerales de baja ley, donde la extracción de metales es realizada por microorganismos específicos que llevan a cabo la solubilización. En este trabajo se evaluó la acción microbiana de dos consorcios mesófilos sobre un mineral concentrado del distrito minero Andacollo (Neuquén, Argentina), conteniendo pirita (FeS_2), esfalerita (ZnS) y covelita (CuS) como componentes mayoritarios con una concentración en oro y plata de 65,4 y 5.9 g/ton, respectivamente.

Se conformaron dos consorcios con microorganismos acidofílicos; uno con dos cepas de colección y otro con un consorcio bacteriano nativo obtenido de las inmediaciones del yacimiento. Las experiencias se realizaron en bioreactores agitados neumáticamente a 30°C con 1% p/v de densidad de pulpa #200. Se utilizó un medio de cultivo definido sin hierro a pH inicial 1,8. Además, se incluyó un control estéril. Se realizó el seguimiento del pH, Eh, y metales en solución; y se realizaron ensayos de difracción de rayos X (DRX) y cianuración sobre el mineral.

Los porcentajes de solubilización de cobre, zinc y hierro fue 75,3; 27,2 y 22,5 para el consorcio de cepas de colección; 51,4; 21,8 y 16,4 para el consorcio nativo y para el sistema estéril 10,0; 0,9 y 1,9; respectivamente. La solubilización de cobre siguió del modelo cinético de núcleo reactivo. Los ensayos de cianuración mostraron que ambos consorcios fueron capaces de mejorar la recuperación de oro (>70%) respecto al ensayo control estéril (37%).

Palabras Clave: biohidrometalurgia, cobre, zinc, concentrado de oro, microorganismos acidofilos.

ABSTRACT

Biohydrometallurgy is an alternative that has grown in interest and commercial applications in recent decades, as it is a profitable, efficient and biosustainable process. In this way, low-grade minerals can be processed by specific microorganisms that carry out the metal solubilization. In this work, the microbial performance of two mesophilic consortiums on a concentrated mineral from the Andacollo mining district (Neuquén, Argentina) was evaluated. The mineral contains pyrite (FeS_2), sphalerite (ZnS) and covelite (CuS) as major components with 65,4 g/ton of gold and 5.9 g/ton of silver.

Two consortia with acidophilic microorganisms were used; one with two collection strains and another with native bacteria obtained from the mining area. The experiments were carried out in pneumatically stirred bioreactors at 30 ° C, with 1% w/v pulp density # 200. A defined culture medium without iron with initial pH 1.8 was used. In addition, a sterile control was included. The pH, Eh and metals in solution were measured. In addition, X-ray diffraction and cyanidation tests were carried out. The solubilization percentages of copper, zinc and iron were 75.3, 27.2 and 22.5 for the collection strains; 51.4, 21.8 and 16.4 for the native consortium and 10.0, 0.9 and 1.9 for the sterile system; respectively. The dissolution of copper followed the shrinking core kinetic model.

Solid residues were used in cyanide leaching tests that showed more than 70% of gold recovery for both cultures and 37% for the sterile control assay.

Keywords: biohydrometallurgy, copper, zinc, gold concentrate, acidophilic microorganisms.

INTRODUCCIÓN

Gran cantidad de metales de interés industrial se encuentran en forma de sulfuros en la naturaleza. Si bien la pirometalurgia es el tratamiento más utilizado para el tratamiento de este tipo de minerales, en las últimas décadas se ha incrementado la utilización industrial de técnicas incluidas en la biohidrometalurgia, destacándose la biolixiviación y la biooxidación de minerales [1]. Para el caso particular de minerales de oro refractarios, el empleo de microorganismos oxidantes del hierro y del azufre, capaces de crecer a distintas temperaturas es una tecnología eficiente como pre-tratamiento del mineral [2].

La producción minera de oro a nivel mundial registró una cifra récord en 2017, con un total de 3.292 toneladas extraídas. China encabeza la clasificación, seguidos por Australia, Rusia, Estados Unidos y Canadá en los cinco primeros puestos, con Perú y Sudáfrica a mayor distancia. En relación a la producción nacional el informe Gold Focus 2018, realizado por la consultora Metal Focus especializada en metales preciosos, destaca también a Argentina en términos de crecimiento y la posiciona en el puesto 13 de la lista, indicando que aumentó su producción de oro un 10,9%, desde 58 a 65 toneladas, gracias a la mejora de la productividad en sus minas de Cerro Negro y Veladero [3]. La provincia de Neuquén tiene reservas importantes conteniendo oro refractario. La explotación de los yacimientos se llevó a cabo de manera intermitente alternando períodos prósperos, con la intervención de empresas públicas y/o privadas, con otros donde la actividad disminuyó ostensiblemente. En todos los casos el proceso aplicado contempló la extracción del mineral y su posterior concentración por flotación pero nunca se aplicó biohidrometalurgia como pretratamiento.

En este trabajo se estudió la biooxidación de una muestra de concentrado de flotación del yacimiento Andacollo-Neuquén utilizando dos consorcios bacterianos, uno compuesto por cepas de colección (*Acidithiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidans*) y otro con

cepas nativas aisladas de la zona del mismo yacimiento minero.

PARTE EXPERIMENTAL

Mineral

El mineral utilizado fue extraído del distrito minero Andacollo. El tipo de yacimiento es mesotermal y se encuentra ubicado en el departamento Minas, Neuquén, Argentina. Las vetas, encajadas en andesita, dacita, (rocas volcánicas) o en pizarra, tienen rumbo predominante E-O y NE-SO, con fuerte inclinación hacia el N y al SE y hasta la vertical [4]. En este trabajo, se utilizó mineral concentrado por flotación en la plata de tratamiento de la localidad de Andacollo. La muestra fue molida hasta pasante malla Tyler 200 (74 μ m) y presentó la siguiente composición química en ppm: Fe 1394, Zn 626 y Cu 31. La ley del concentrado fue determinada por la empresa Andacollo Gold y resultó ser Au 65,4 g/ton y Ag 5.917 g/ton. El mineral concentrado está constituido por sulfuros polimetálicos; y el oro está principalmente ocluido en pirita. Adicionalmente, gran cantidad de zinc y cobre se encuentran en forma de sulfuros. Por análisis DRX se determinó que las fases presentes en la muestra fueron pirita, esfalerita, covelita, galena cuarzo y feldespato.

Consortios microbianos

Para este estudio, se utilizaron dos tipos de inóculos, uno conformado por cepas microbianas autótrofas de colección y otro compuesto por un consorcio de microorganismos aislados en el predio de la empresa minera que opera en la localidad de Andacollo (Neuquén). Las cepas de colección fueron *Acidithiobacillus ferrooxidans* DSM 11477 y *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 11478 llamadas en este trabajo “Af” y “At”, respectivamente. Mientras que, al consorcio proveniente de los acopios generados en antiguos procesos de flotación y que en la actualidad constituyen un pasivo ambiental minero, se lo llamó “nativo” del cual la población mayoritaria pertenece a la familia

Acidithiobacillaceae. Cada consorcio fue cultivado en medios específicos a 30°C.

Procedimiento experimental para los ensayos de biolixiviación

Las experiencias se realizaron en biorreactores neumáticamente agitados conteniendo un volumen final de 3 L de medio 882 sin agregado de sales de hierro (II) a pH 1,8; 30°C y el mineral, con densidad de pulpa de 1% p/v. Se preparó también un control estéril en las mismas condiciones adicionando timol en metanol (al 1% p/v) en lugar del inóculo.

Inicialmente se realizó la estabilización de pH mediante el agregado de H_2SO_4 1:3, de acuerdo con los ensayos preliminares. Luego se realizó la inoculación de los biorreactores al 10 % del volumen final utilizando cultivos del consorcio nativo y del consorcio Af-At, según corresponda, previamente filtrados y resuspendidos en medio líquido estéril.

Durante el desarrollo del ensayo, se extrajeron muestras periódicas para la determinación de pH, Eh; hierro total, zinc y cobre por espectrofotometría de absorción atómica. Los residuos de minerales de cada ensayo fueron analizados por difracción de rayos X y adicionalmente se realizó cianuración sobre los mismos para evaluar la recuperación de oro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los experimentos de biooxidación se mantuvieron en operación durante 150 días. La evolución del pH y Eh para los tres sistemas se muestra en la Figura 1.

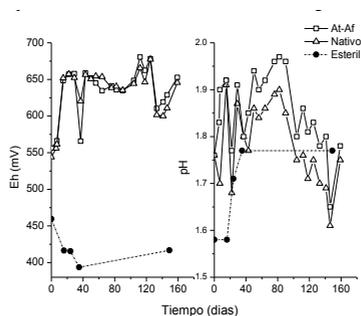


Figura 1. Evolución del pH y Eh para los ensayos de biooxidación y estéril usando el mineral concentrado por flotación en la planta de tratamiento de Andacollo.

A partir de las mediciones de pH se pudo observar que ambos consorcios presentaron similar evolución con valores iniciales alrededor de 1,75, con incrementos hasta 1,9-1,95 para luego disminuir, posiblemente debido al ácido producido por la actividad oxidativa de las bacterias oxidantes del azufre. Por otro lado, el pH en el control estéril tomó un valor inicial de 1,58 tendiendo a aumentar, posiblemente debido a la disolución de especies alcalinas contenidas en el mineral, alcanzando valores cercanos a 1,76. El Eh inicial en los sistemas inoculados fue de 550 mV y se estabilizó en aproximadamente 650 mV y en 400 mV en el estéril.

Las cinéticas de solubilización de cobre, cinc y hierro se muestran en la Figura 2.

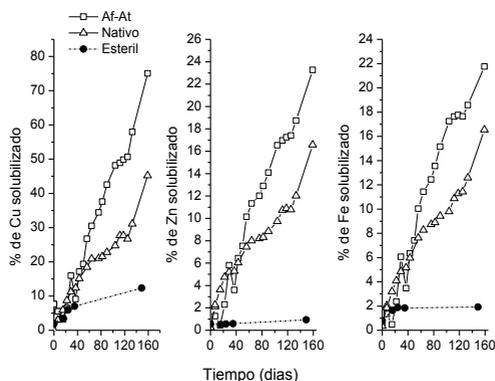


Figura 2. Solubilización de metales Cu, Zn y Fe del concentrado tratado en los ensayos de biooxidación y esteril

Se puede observar que el consorcio compuesto por At-Af solubilizó más rápidamente y un mayor porcentaje de todos los metales con respecto al consorcio nativo. En la tabla 1 se presentan los valores de las cantidades de metales solubilizados a los 150 días de experiencia.

Tabla 1: Valores alcanzados en la solubilización de metales por los consorcios y sistema estéril luego de 150 días de ensayo [ppm]

Metal	Concentración de metal [ppm]		
	Consortio con cepas Af-At	Consortio con cepas nativas	Control estéril
Cu	23,27	13,96	3,10
Zn	145,68	110,31	5,75
Fe	303,30	230,70	26,92

El análisis de los difractogramas de DRX de los residuos generados en el proceso de biooxidación permitió observar una disminución en la intensidad de los picos asignados a pirita y esfalerita, mientras que no pudo ser detectada covelita debido a la oxidación que sufrió este mineral durante el proceso. Adicionalmente, se observaron líneas de difracción correspondientes a azufre proveniente de la oxidación de

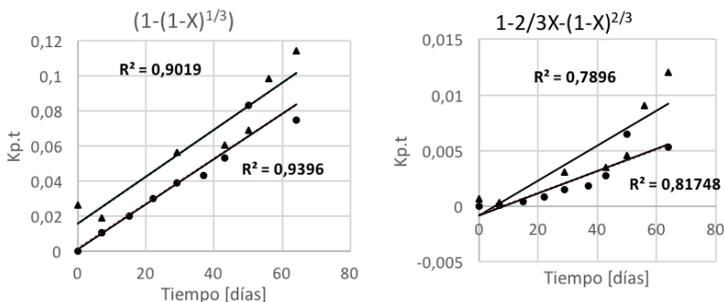
la esfalerita. Por otra parte, en los difractogramas no se evidenció presencia de jarosita ya sea porque se formó en pequeñas cantidades y no pudo ser cuantificada o porque las condiciones de pH no favorecieron la precipitación de este hidroxisulfato.

Mediante los ensayos de cianuración se comprobó un incremento en la recuperación de oro en las muestras tratadas por biooxidación siendo los porcentajes obtenidos: 70,2% para el cultivo Af-At, 76,1% para el consorcio nativo y 37,1% para el mineral sometido a lixiviación química.

Adicionalmente, se aplicó el modelo de núcleo reactivo a la cinética de biolixiviación de cobre del mineral concentrado. El modelo propone que la cinética puede ser controlada por alguno de los pasos que ocurren en la interfase sólido-líquido; difusión a través de la película líquida, difusión a través de la capa de producto o reacción química. En sistemas de biolixiviación llevados a cabo en tanques con agitación, se puede suponer que la cinética de lixiviación no está controlada por problemas de difusión a través de películas líquidas [5].

Se analizaron los ajustes de los datos experimentales en gráficas de $k_p t = 1 - 2/3X - (1-X)^{2/3}$ y de $k_p t = (1 - (1-X)^{1/3})^3$, que representan la difusión a través de la capa producto y la reacción química, respectivamente. En las ecuaciones k_p representa la constante de velocidad parabólica (días^{-1}), t el tiempo (días) y X la fracción de cobre reaccionado [6].

Se pudo determinar que para los dos ensayos de biooxidación, al inicio de la disolución de cobre (en los primeros 60 días) el control de la cinética de disolución fue químico ya que en esta etapa ocurre el ataque al mineral por los agentes oxidantes, sin problemas difusivos desde el medio líquido hacia la superficie del mineral (Figura 3).



Figuras 3. Ajuste de datos experimentales de disolución de cobre para mineral Andacollo al inicio de la biolixiviación utilizando el modelo de núcleo reactivo:(▲) Af-At y (●) nativo.

En cambio, al finalizar la disolución del cobre ninguna de las etapas tuvo control exclusivo del proceso (Figura 4), posiblemente debido a que durante la lixiviación del mineral se generó una capa de azufre elemental, según indican los difractogramas, o un posible precipitado de jarosita sobre la superficie del mineral, impidiendo la libre difusión tanto de los agentes oxidantes hacia el mineral como de los productos obtenidos hacia el medio.

Las productividades máximas alcanzadas por el consorcio Af-At para Cu y Zn fueron 0,42 y 3,14 ppm/día; para el consorcio nativo 0,34 y 2,91 y para el estéril 0,10 y 0,04 respectivamente. La menor performance desarrollada por el consorcio nativo podría deberse a que éste fue aislado de una zona del yacimiento donde las condiciones ambientales presentaban valores de pH cercanos a la neutralidad y posiblemente esto ha causado una disminución en las capacidades metabólicas de los microorganismos presentes para oxidar sulfuros y/o hierro en condiciones de acidez extrema y para mejorar su rendimiento habría que someterlo a periodos de adaptación al mineral y a las condiciones de ensayo más prolongados.

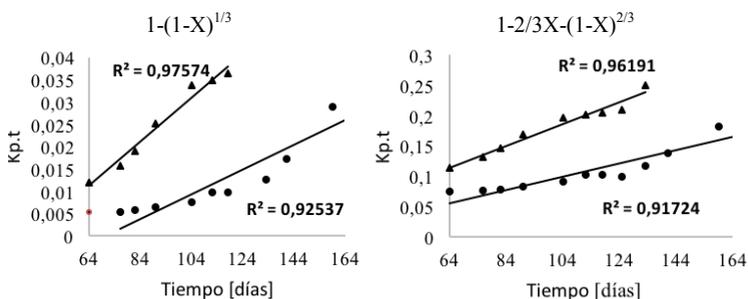


Figura 4. Ajuste de datos experimentales de disolución de cobre para mineral de Andacollo al final de la biolixiviación utilizando el modelo de núcleo reactivo:(▲) Af-At y (●) nativo.

CONCLUSIONES

Los tratamientos de biooxidación del concentrado de flotación de Andacollo permitieron un porcentaje de solubilización de cobre, zinc y hierro de 75,3; 27,2 y 22,5 para el consorcio de cepas de colección; 51,4; 21,8 y 16,4 para el consorcio nativo y para el sistema estéril 10,0; 0,9 y 1,9; respectivamente. La cianuración de los residuos de los ensayos mostró un incremento en la recuperación de oro en las muestras tratadas por biooxidación de 70,2% para el cultivo Af-At, 76,1% para el consorcio nativo y 37,1% para el control estéril; indicando el beneficio en la utilización del pre-tratamiento en la recuperación de oro.

Los modelos aplicados a los ensayos de biooxidación indican que al inicio de la disolución de cobre el control de la cinética fue químico y que a partir de los 60 días no hubo control exclusivo del proceso por difusión a través de la capa producto o por reacción química, en concordancia con lo observado en los difractogramas de rayos X.

REFERENCIAS

1. J.A. Brierley and C.L. Brierley. Present and future commercial applications of biohydrometallurgy. Biohydrometallurgy and

Environment toward the mining of the 21st century: Proceedings of the International Biohydrometallurgy Symposium IBS 99, Madrid, España. R. Amils and A. Ballester (Eds.), Part A 81-89. 1999.

2. T. Williams, M. Gunn, A. Jaffer, P. Harvey, P. Tittes. The application of Geobiotics, LLC'S GeoCoat® Technology to the bacterial oxidation of a refractory arsenopyrite gold concentrate. Hydrometallurgy: Proceedings of the Sixth International Symposium. Ed. Young, C.; Taylor, P.; Anderson, C.; Choi, Y. 474-483. 2008.
3. <https://www.oroinformacion.com/es/OroInformacion/60/1492/Nuevo-r%C3%A9cord-de-la-producci%C3%B3n-minera-de-oro-en-2017-3292-toneladas.htm>
4. V. Angelelli, C. Fernandez Lima, A. Herrera, L. Aristarain. Descripción del mapa metalogénico de la República Argentina, 106-107. 1970.
5. J. Viñals. Cinética de las reacciones heterogéneas. In: A. Ballester, L. Verdeja, J. Sancho (Eds.), Metalurgia Extractiva, vol. 1. Ed. Síntesis, España. 169-198. 2000.
6. A. Giaveno, L. Lavalle, P. Chiacchiarini, E. Donati. Airlift reactors: characterization and applications in biohydrometallurgy. E. Donati and W. Sand (Eds.), Microbial Processing of Metal Sulfides. Springer. Dordrecht-Holanda. 169-191. 2007.