

# Lixiviación de oro en muestras sulfuradas pre-oxidadas con bacterias

Fernando Torres<sup>1</sup>, Adriana Sofía Tua<sup>1</sup>, & Denis Martin Riquelme<sup>1</sup>.

(1) *Instituto de Investigaciones Mineras (IDIM). Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas. Universidad Nacional de Catamarca. Maximio Victoria N° 55 (4700). Catamarca, Argentina. TE: 54-3834-435112. [ftorres@tecno.unca.edu.ar](mailto:ftorres@tecno.unca.edu.ar).*

**RESUMEN:** La aplicación de bacterias al procesamiento de minerales es una alternativa de extracción de metales de bajo impacto ambiental, que está siendo aplicada con diferentes propósitos para lixiviar estériles de minas y la explosión de minerales de baja ley. Pero también se han comenzado a utilizar bacterias del hierro para oxidar minerales sulfurados que resultan refractarios a la lixiviación de minerales en los que se aplica este proceso. En particular, en la lixiviación de menas refractarias que contienen oro ocluido en sulfuros como pirita, marcasita, arsenopirita, se puede aplicar bacterias para biooxidar la pirita, como alternativa a la tostación, permitiendo aplicar reactivos para capturar el oro. La mena objeto de estudio es una mena de doble refractabilidad (DRGO), gran parte del oro se encuentra ocluido en sulfuros (pirita y marcasita principalmente) y presencia de materia carbonosa. En este trabajo se realizaron ensayos de presencia bacteriana (“agitated flasks”) y biooxidación en frascos, para luego lixiviar con cianuro de sodio y tiosulfato de amonio. La lixiviación con tiosulfato de las muestras biooxidadas a 21 y 40 días, produjo recuperaciones de 77,6 % a 21 días de biooxidación y 24 hs de lixiviación) y 82,5 % a 40 días de biooxidación y 72 hs de lixiviación. La recuperación obtenida mediante la biooxidación y lixiviación con cianuro ha alcanzado un valor de recuperación cercano al 65 %, esta menor recuperación puede atribuirse al efecto preg-robbing que tiene la presencia de materia carbonosa en las muestras. Los resultados de los ensayos combinados de biooxidación bacteriana y lixiviación con tiosulfato de amonio y cianuro de sodio, se concluye que resulta mejor optar por el tiosulfato de amonio en concentración de 0,6 M, agregando hidróxido de amonio a una concentración entre 0,8M y 1 M y cobre como sulfato de cobre en una concentración variable entre 0,05 y 0,1 %. Las recuperaciones obtenidas con tiosulfato alcanzan valores entre un 65 y 80 % en ensayos en frascos con granulometrías más finas que las que se usan en pilas.

## 1 INTRODUCCION

Desde 1980, la producción de oro a nivel mundial se viene incrementando. La mayor parte del oro se extrae desde menas primarias a las que se aplica el proceso de cianuración, obteniéndose una recuperación generalmente elevada con gran facilidad. Sin embargo, existen menas que por su mineralogía, son refractarias a los procesos de cianuración, por encontrarse el oro ocluido en los sulfuros tales como pirita, marcasita, arsenopirita, por ejemplo.

Muchos son los yacimientos que encuentran estas dificultades de procesamiento a pesar de tener contenidos en oro. Los procesos oxidativos pueden usarse como pre tratamiento de las menas de sulfuros con contenidos de oro, ya que incrementan la recuperación. Estos métodos oxidativos se aplican cuando estas menas dan una

baja recuperación de oro en la cianuración por diferentes razones como pueden ser:

-Oro ocluido en gangas reactivas como los sulfuros, que no pueden ser convenientemente liberados, aún con molienda fina.

-Oro acompañado de minerales que son altamente consumidores de reactivos, como ser: pirrotina, marcasita y arsenopirita.

-Oro, acompañado por matrices carbonosas que adsorben oro durante su lixiviación.

-Cualquier combinación de las anteriores.

## 2. LAS BACTERIAS EN LA LIXIVIACIÓN DE MINERALES

Los microorganismos que participan en las transformaciones químicas de los minerales, están caracterizados por su capacidad para desarrollarse en ambientes extremos.

De ellas se destacan las del género *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, las que han sido ampliamente estudiadas.

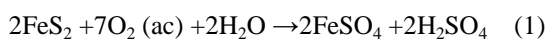
### 2.1 Aplicación de bacterias a la oxidación de minerales refractarios con contenido aurífero.

Uno de los problemas tradicionales de la minería aurífera son los sulfuros que contienen oro tales como la pirita, la marcasita y la arsenopirita. Estos minerales son refractarios a los tratamientos normales de cianuración. Los minerales refractarios se han tratado tradicionalmente mediante tostación, también se han usado procesos de lixiviación química a altas temperaturas y presiones.

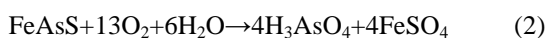
La alternativa a estos procesos es utilizar microorganismos a distintas temperaturas, la que ha tenido un gran desarrollo en varios países y cada vez cobra mayor importancia, dado que se explotan minerales de mayor complejidad mineralógica. El proceso de aplicación de bacterias para estos minerales se denomina "Biooxidación de minerales de oro" y se ha aplicado a la lixiviación en pilas de minerales de baja ley y a la lixiviación de concentrados en reactores (Pirita y arsenopirita).

Las reacciones que dan cuenta de la liberación del oro son las siguientes:

Para pirita:



Para arsenopirita:



En ambos casos el Fe (II) puede ser re oxidado por las bacterias generando Fe (III) que a su vez puede acelerar las oxidaciones de pirita y arsenopirita, así todas estas reacciones producen la liberación del oro.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Preparación de la muestra sólida

El mineral en trozos de 15 cm fue procesado reduciendo su tamaño mediante una trituration primaria con trituradora de mandíbulas y

secundaria por molino de rollos, seguido a una clasificación por tamaños en Ro-Tap. Las etapas de reducción de tamaños y cuarteos siguieron la tabla de Richards. Las muestras para análisis químicos y ensayos se tamizaron siguiendo la serie de tamices Tyler.

### 3.2 Mineralogía de la muestra

La pirita es el mineral predominante en la muestra. La marcasita es abundante y, en menor medida (trazas) presenta: Arsenopirita, molibdenita, esfalerita, galena, calcopirita, tetraedrita y grafito. La ganga está compuesta de cuarzo, menor cantidad de dolomita, calcita y trazas de barita, yeso y sericita.

El oro se presenta muy fino y aparece principalmente ocluido en sulfuros. Algunos ensayos de lixiviación han mostrado que, solamente el 12% del total del oro presente está como oro libre, el 84% del oro se presenta asociado con sulfuros y, aproximadamente el 4% asociado con la ganga.

## 4. EXPERIMENTAL

### 4.1 Preparación de medios

Para aislar bacterias hierro-oxidantes se preparó un medio de cultivo compuesto de: Solución (a):  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \sim 0,4$  gr,  $\text{KH}_2\text{PO}_4 \sim 0,056$  gr,  $\text{MgSO}_4 \sim 0,4$  gr, en 1.000 ml. Solución (b):  $\text{FeSO}_4 \sim 3$  gr/l. El pH se ajusta a 1,6 con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . En todos los casos se trabajó con reactivos de grado analítico de pureza.

### 4.2 Preparación y siembra de las muestras

#### 4.2.1 *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Muestras sólidas: Se siembra en erlrmeyer de 250 ml: 95 ml del medio de cultivo conteniendo 3 g/l de  $\text{SO}_4\text{Fe}$  a pH 1,6 y entre 5 y 10 gr de muestra sólida. Para los repiques, se concentra la solución mediante microfiltración, usando un equipo Millipore® y una bomba de vacío. (Fotografía 1)

#### 4.2.2 *Acidithiobacillus thiooxidans*

Muestras sólidas: Se siembra en erlrmeyer de 250 ml: 95 ml del medio de cultivo conteniendo azufre a pH 3,5 y entre 5 y 10 gr de muestra sólida. Para los repiques, se concentra la solución mediante microfiltración, usando un equipo

Millipore® y una bomba de vacío. Se hace un frasco control estéril (medio nutritivo y una fuente de azufre). Las muestras se colocan en agitador orbital a 100 rpm y se incuban en estufa de cultivo a 30°C – 35°C.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

El tiempo en el cual se observaron los cambios en los frascos ensayados estuvo en relación con los valores obtenidos en la medición del pH y Eh, indicadores indirectos del crecimiento de los microorganismos en las condiciones establecidas.

Una vez alcanzados los valores de potencial cercanos a 600 mV, se realizaron observaciones microscópicas que comprobaron la existencia de las bacterias del hierro, que se evidencia por el cambio de coloración en el frasco a color rojo-anaranjado. (Fotografía 3)

La Fig. 1, muestra la evolución de los valores de Eh. Un tiempo de 26 días de contacto es el necesario para lograr obtener valores de potencial compatibles con un crecimiento bacteriano que luego se mantiene más ó menos constante en las cercanías a los 600 mV.

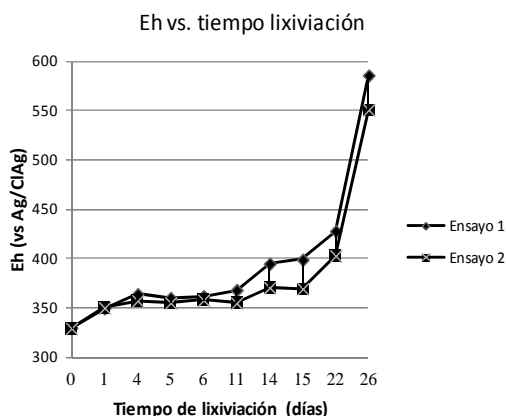


Fig. 1: Variación del potencial con el tiempo, indicador de crecimiento bacteriano.

La Figura 2 muestra los valores de potencial en el repique, puede verse que crece rápidamente volviendo a alcanzar el máximo de desarrollo bacteriano en un tiempo mucho menor que los 26 días del inicio. El nuevo tiempo de lixiviación es de 7 días, coincidente con valores de Eh cercanos a 550-600 mV (vs Ag/ClAg).

La cinética del crecimiento, como es de esperar, es mucho mayor en el repique. Estos valores de

crecimiento son importantes a los efectos de estimar la acción bacteriana en el proceso de biooxidación de los minerales sulfurados, con fines de aplicar la misma en tanque ó en pilas.

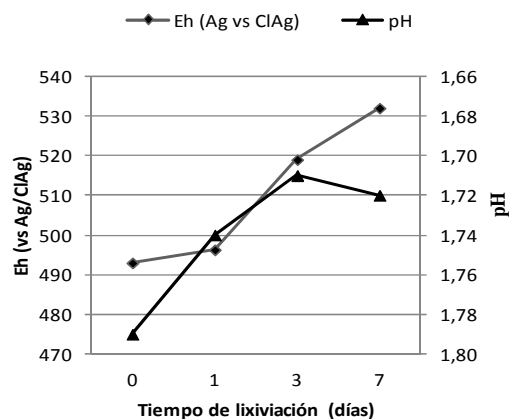


Fig. 2: Variación del potencial y pH con el tiempo de lixiviación en repique.

### 5.1 Observaciones microscópicas

Se tomaron muestras regularmente del ensayo inicial y repique para observar al microscopio la presencia bacteriana. Para ello se toma una alícuota como muestra y se centrifuga a 2.500 r.p.m. Con el sedimento se realizan los preparados para la observación en fresco y para la coloración de Gram.

Se observaron los preparados en el microscopio óptico con contraste de fase, pudiéndose comprobar la existencia de las bacterias hierro-oxidantes y azufre-oxidantes. En el repique se observó una mayor concentración bacteriana que en el ensayo inicial. (Fotografía 4)

## 6. ENSAYOS DE LIXIVIACION

### 6.1 La Lixiviación de oro con tiosulfato

En la actualidad el cianuro es el agente lixivante más ampliamente usado en la extracción de metales preciosos tales como el oro y la plata, debido a su bajo costo y simplicidad química, pero la mayor desventaja que posee es el alto costo de manejo por su alta toxicidad, lo que requiere mayores costos en los procesos para prevenir el impacto ambiental. Por otra parte, las normas ambientales a las cuales están siendo sometidas actualmente las plantas mineras en

todo el mundo determinan la necesidad de Continuar investigando alternativas en el procesamiento de menas de oro.

Entre los lixiviantes alternativos al cianuro se encuentra el tiosulfato de amonio o sodio, el cual presenta un comportamiento muy favorable para minerales que contienen cobre y cierta cantidad de materias carbonáceas, que es el caso de la muestra sulfurada de estos ensayos. Es usado en la fertilización de cultivos como soja, maíz y trigo, por contener principalmente azufre y nitrógeno.

En el procesamiento de menas de oro sulfuradas, cada vez más frecuentes para obtener oro, existe la problemática de tratar menas con contenidos de carbón. Mientras es un hecho que la presencia de carbón en la mena redissuelve el oro cuando el complejo es el dicianoaurato, si la lixiviación se hace por la vía del tiosulfato y el complejo formado es el aurotiosulfato, este efecto de redisolución de oro no se produce, desconociéndose la razón de este hecho, en el estado actual de la investigación.

## 6.2 Ensayos de lixiviación con muestras pre-tratadas con bacterias

Las muestras biooxidadas por 21 días y 40 días, se lixiviaron en frascos con tiosulfato de sodio + hidróxido de amonio + cobre, a fin de evaluar la recuperación de oro luego del pre-tratamiento bacteriano y, atendiendo a la posible presencia de materia carbonosa. A los fines comparativos se lixivió con cianuro de sodio (500 ppm) a la muestra biooxidada a 40 días.

## 7. CONCLUSIONES

- Se ha ensayado una muestra sulfurada con una ley de oro en cabeza de 10,05 gr/tn, con la característica de ser una mena DGRO es decir una mena de doble refractabilidad, dado que gran parte de oro se encuentra ocluido en sulfuros (pirita y marcasita principalmente) y presencia de materia carbonosa, que adsorbe oro cuando se lixivian con cianuro.

- La mineralogía compleja de este sulfuro ha dado valores de recuperación con cianuro muy bajos que hacen no factible este tratamiento común de menas de oro.

- Con fines de realizar un pre-tratamiento oxidativo a esta mena, se ejecutaron ensayos de presencia de bacterias mediante la aplicación de la técnica de los “frascos agitados”, determinándose el crecimiento bacteriano en muestras sólidas por indicación indirecta de la presencia de bacterias del hierro (mesófilas) midiendo el potencial de las muestras y determinando su máximo desarrollo a distintos tiempos de contacto, observando periódicamente mediante microscopio.

- Mediante los ensayos en frascos agitados y observaciones microscópicas se ha logrado determinar la presencia de bacterias autóctonas (propias del mineral), que pertenecerían al grupo de bacterias del hierro, mesófilas, (crecen a temperaturas entre 28 y 35°) posiblemente del género *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Lepthospirillum ferrooxidans*.

- El tratamiento oxidativo aconsejable es por lo tanto la biooxidación del sulfuro mediante las bacterias autóctonas de este mineral, que crecerán espontáneamente a pH cercano a 2 y agregando medio de cultivo propio para estas bacterias, este método es altamente aconsejable comparativamente con el cualquier método de tostación por su bajo impacto ambiental.

- De los ensayos de lixiviación con tiosulfato de las muestras biooxidadas a 21 y 40 días, se puede apreciar que las recuperaciones obtenidas son prácticamente iguales en ambos casos (77,6 % a 21 días de biooxidación y 24 hs de lixiviación) y 82,5 % a 40 días de biooxidación y 72 hs de lixiviación)

- De acuerdo a los ensayos de biooxidación en erlenmeyer, se puede decir que el tiempo de contacto para biooxidar la mena sulfurada es entre 30 y 40 días.

- Considerando los resultados de los ensayos combinados de biooxidación bacteriana y lixiviación con tiosulfato y cianuro, se concluye que resulta mejor optar por el tiosulfato de amonio en concentración de 0,6 M, agregando hidróxido de amonio a una concentración entre 0,8M y 1 M y cobre como sulfato de cobre en una concentración variable entre 0,05 y 0,1 %.

- Las recuperaciones obtenidas con tiosulfato alcanzan valores entre un 65 y 80 % en ensayos en frascos con granulometrías más finas que las que se usan en pilas.

•La recuperación obtenida mediante la biooxidación y lixiviación con cianuro han alcanzado un valor de recuperación cercano al 65 %, esto se debe muy probablemente al efecto preg-robbing que tiene la presencia de materia carbonosa, ó a un tiempo de biooxidación menor al óptimo (se usó 30 días).

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. “Lixiviación de oro con tiosulfato de amonio catalizado con ión cúprico desde un concentrado polimetálico”. P. Navarro D. , A. Villarroel P., F. Alguacil P. Jornadas SAM-CONAMET – AAS,2.001.
2. Theory and Practice of Gold and Silver Extraction, Yen et al., pp 32 – 50, 1996.
3. “The impact of thiosulfate oxidation products on the oxidation of gold in ammonia thiosulfate solution” – C.K. Chu. P.L. Breuer. M.I. Jeffrey. Minerals Engineering 16, (2.003), pp 265-271.
4. “A fundamental study of ferric oxalate for dissolving gold in thiosulfate solutions. I Chandra, M.I. Jeffrey. Hidrometallurgy 77 (2.005), pp 191-200.
5. “Solution chemistry factors for gold thiosulfate heap leaching”. Ron-Yu Wan, K.Marc Le Vier. International Journal of Mineral Processing (2.003). pp 311-322.
6. “Gold Extraction From Mild Refractory Ore Using Ammonium Thiosulfate”. Wan-Tai Yen and Massoud Aghamirian.
7. “An electrochemical study of the effect of additives and electrolyte on the dissolution of gold in thiosulfate solutions”. I. Chandra, M.I. Jeffrey. Hydrometallurgy 73 (2.004), pp 305-312.
8. “A study of the gold colloid dissolution kinetics in oxygenated ammoniacal thiosulfate solutions”. Xin M. Zhang, Gamini Senanayake, Michael J. Nicol. Hidrometallurgy (2.004). Article in press.
9. “Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review). A. Grosse, G. Dicoski, M.Shaw, P. Haddad. Hidrometallurgy 69 (2.003), pp 1-23.
10. “Kinetic aspects of gold and silver leaching in ammonia-thiosulfate solutions”. M.I. Jeffrey. Hydrometallurgy 60 (2.001) pp 7-16.
11. “Thiosulfate leachig of gold – a review. M.G. Aylmore and D.M. Muir. Minerals Engineering Vol. 14, N°2 pp 135-174. (2.001).
12. “Thiosulfate stability in gold leaching process”. Chen Xia. Thesis for the degree of Master of Science. Queen’s University, Ontario, Canadá. May (2.001).
13. “El Tiosulfato como Alternativa Limpia en la Lixiviación de oro y plata”. Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, “II Jornadas Universitarias de Ingeniería”. Universidad Nacional de Catamarca 14 y 15 de Octubre de 2004.
14. “El Tiosulfato como Alternativa Limpia en la Disolución de oro y plata”. Torres, F.; Flores, M.; Barrionuevo, G., Comunicación. I Semana Ibero-Americana de Engenharia de Minas (SIAM). Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. Sao Paulo. Brasil.(2004)
15. “Una alternativa al cianuro de sodio en la lixiviación de oro y plata”. Torres, F.; Flores, M.; Barrionuevo, G.; Petek, E.; Yurquina, B.; Regalado, T.; Gallina, S.I Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Jujuy. 10 y 11 de Noviembre de 2005.
16. “Algunas Consideraciones sobre la Disolución de Oro y Plata con Tiosulfato”. VII Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas. Colegio Argentino de Ing. de Minas –CADIM-UNSJ. 15 al 17 de Noviembre de 2005.
17. “Ensayos Preliminares de Disolución de Oro y Plata con Tiosulfato”. Torres, F.; Flores, M.; Regalado, T.; Tua, A. II Latinometalurgia, Cusco, Perú. Trabajo presentado y aprobado. (Octubre de 2007)
18. “Lixiviación de oro y plata con tiosulfato”. Torres, F; Mas, M.; Regalado, O.; Tua, A. IX Jornadas de Tratamiento de Minerales (JATRAMI) y XVI Reunión Anual de la Asociación Iberoamericana de Enseñanza Superior de la Minería. (AIESMIN). Universidad Nacional de San Juan. Octubre de 2.008.
19. “El tiosulfato como alternativo al cianuro en la lixiviación de oro”. Torres, F; Mas, M. VI Congreso latinoamericano de Ciencias Aplicadas a la Industria. (CLICAP). Sede San Rafael de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. (Marzo, 2.012)

## 8. FOTOGRAFÍAS



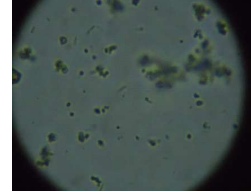
Fotografía 1: Muestra



Fotografía 2: Muestra biooxidada



Fotografía 3: Test de biooxidación



Fotografía 4: Observación Microscópica