

Introducción a la Biometalurgia

Delia Ho Lock*

Sección Ingeniería de Minas, Departamento de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica del Perú,
Lima 32, Perú

Resumen

El presente trabajo ofrece una idea general de lo que es la Biometalurgia y sus alcances. Pretende incentivar la investigación en ésta área, al tener en cuenta que los yacimientos mineros peruanos resultan muy apropiados para el uso de esta tecnología.

La Biometalurgia abarca procesos relativamente sencillos pero multidisciplinarios (químicos, metalurgistas y biólogos), que posibilita la recuperación de constituyentes menores en minerales de forma económica.

Palabras clave: Biometalurgia, biolixiviación, biooxidación

Introducción

La necesidad de beneficiar minerales de baja ley, relaves metalúrgicos ó menas sulfuradas conteniendo oro en matrices de pirita ó arsenopirita refractaria, de una manera más eficiente, ecológica y económica, han convertido a la biometalurgia en la mejor alternativa de tratamiento en nuestros días.

Muchos de los problemas que aquejan a la industria minero-metalúrgica no pueden solucionarse mediante tecnologías convencionales (basadas en su mayor parte, en separaciones físicas ó en la química a alta temperatura), incentivando la investigación y el desarrollo de procesos alternativos, entre los que destaca la hidrometalurgia.

En los últimos años, la aplicación de técnicas biológicas en la metalurgia ha tomado gran importancia, dando lugar a lo que hoy conocemos como "biometalurgia", la cual puede ser

definida de manera general como una rama de la biotecnología que estudia las aplicaciones y el potencial económico entre el mundo de los minerales y el mundo de las bacterias.

La biohidrometalurgia consiste en la extracción de metales a partir de minerales utilizando componentes que se encuentran en nuestro medio ambiente, como son: el agua, el aire y la presencia de microorganismos.

La biohidrometalurgia aplicada a minerales de cobre fue practicada en forma empírica en China, muchos siglos antes del descubrimiento de las bacterias (100 ó 200 años A. C), y en Europa por lo menos desde el siglo II. El conocimiento del uso de microorganismos como agentes lixiviantes se remonta a los años 40, al descubrirse la presencia de la bacteria *Thiobacillus Ferrooxidans* en las aguas de drenaje proveniente de la Mina Río Tinto en Huelva, España. En esa época se responsabilizaron a las bacterias del acelerado proceso de corrosión de la maquinaria en la mina, del elevado grado de acidez de las aguas y de una gran concentración de metales en solución en las mismas¹.

Actualmente, conocemos que la bacteria más importante y responsable de la disolución de los metales a partir de minerales, son las *Thiobacillus*, las cuales son organismos quimilitotróficos, autotróficos, aeróbicos, acidófilos y mesófilos. De las especies de bacterias *Thiobacillus* que se conocen, la que más atención ha recibido es la *T. Ferrooxidans*, bacteria de forma bacilar de 1 a 2 micrones de longitud, la cual presenta un flagelo y gram⁻ negativa². La bacteria es capaz de oxidar sulfuros a sulfatos y a ácido sulfúrico, también es la principal causante de la generación de aguas ácidas en las minas y en residuos mineros.

Hay que hacer hincapié en dos términos: biolixiviación y biooxidación, los cuales muchas veces se emplean indistintamente, a pesar de que representan conceptos

* E-mail: dho@pucp.edu.pe

diferentes. La biolixiviación se refiere al uso de bacterias (principalmente la *Thiobacillus Ferrooxidans*, *Leptospirillum Ferrooxidans* ó especies termófilas como la *Sulfobacillus*), para lixiviar metales tales como el hierro, el zinc ó el níquel, partiendo de metales sulfurados y poniendo en solución al metal durante la oxidación. Por el contrario, la biooxidación se refiere a un tratamiento en donde las bacterias son utilizadas para catalizar la degradación de minerales sulfurados (usualmente piritita y arsenopiritita), que encapsulan al oro ó a la plata, en este caso el metal valioso se encuentra en la fase sólida siendo la solución eliminada.

Biolixiviación

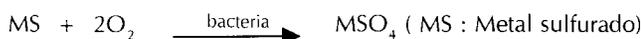
En términos químicos, el proceso de biolixiviación ó lixiviación bacteriana, puede describirse como el ataque y solubilización de un mineral, teniendo a la bacteria como catalizador, la cual actuará directa ó indirectamente sobre el mineral. Como sub-producto de la lixiviación se formarán azufre elemental e iones ferrosos que la bacteria oxidará a ácido sulfúrico ó a iones férricos respectivamente.

Cuando la superficie del mineral donde reside la bacteria se humedece, ésta desarrolla toda su actividad produciéndose la oxidación espontánea de la piritita y de otros sulfuros metálicos, generándose Fe(III), sulfatos solubles y ácido sulfúrico.

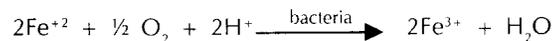
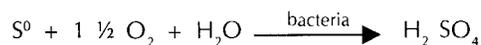
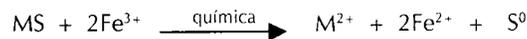
La oxidación del Fe^{+2} y de los compuestos reducidos del azufre ante la presencia de la bacteria, son procesos complejos y de múltiples etapas, aún en estudio.

Se ha propuesto dos mecanismos de acción: el mecanismo directo y el mecanismo indirecto^{3,4}.

El mecanismo directo propone la solubilización del mineral sulfurado debido a la interacción directa de la bacteria sobre el mineral, concretamente la bacteria *T. Ferrooxidans* oxida biológicamente a los sulfuros inorgánicos y a los compuestos de azufre presentes a sulfatos.



El mecanismo indirecto propone la solubilización del mineral sulfurado, por oxidación del mismo, con un producto intermedio: el ión férrico. En este mecanismo el azufre elemental y el ión ferroso son oxidados por la bacteria, operando un ciclo de oxidación-reducción del hierro.



Paralelamente, se tendrá que tener en consideración los principios electroquímicos, en sistemas donde existe más de un tipo de mineral.

Cuando dos minerales de diferente conductividad entran en contacto en solución acuosa, la corriente fluye a través de la solución, desde el mineral con mayor potencial hacia el de menor potencial, formándose un par galvánico. Esta interacción provoca que el mineral de más bajo potencial de reposo (rest potencial) sea sacrificado mientras que el de más alto potencial sea pasivado. Podemos decir que en una combinación de piritita y chalcopiritita, será la chalcopiritita la que se lixiviará selectivamente comportándose como ánodo. Sin embargo la chalcopiritita en combinación con la esfalerita hará que la primera se comporte como cátodo, produciéndose la lixiviación de la segunda⁵.

En todos los casos la adición de bacterias provoca una aceleración del proceso.

La técnica de la biolixiviación ha sido aprovechada en el tratamiento de compuestos de cobre sulfurado en pilas, sobretodo en el tratamiento de minerales de baja ley. El mineral de desmonte y/o de baja ley es lixiviado en pilas donde la actividad bacteriana cataliza la oxidación y solubilización del cobre. Las soluciones enriquecidas que emergen de la base de la pila son colectadas y tratadas para la recuperación del cobre ya sea por electrodeposición (EW) ó extracción por solventes para la obtención de cobre metálico (figura 1).

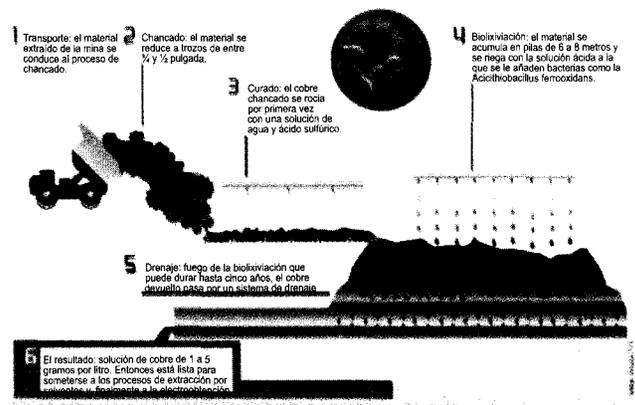


Figura 1. Circuito esquematizado de la biolixiviación del cobre¹³

En mayor o menor grado todos los minerales sulfurados son susceptibles a la lixiviación bacteriana.

Como es bien sabido, la escasez de minerales es cada día mayor, en el siglo pasado se consideraba rentable una ley de cobre superior al 10%, posteriormente gracias a los avances en las técnicas de concentración (flotación) se pudo procesar menas con leyes menores al 1% de cobre. En la actualidad las grandes cantidades de menas con leyes inferiores al 1% de cobre, sólo pueden ser tratadas económicamente mediante la lixiviación asistida por bacterias.

Se estima que la biolixiviación contribuye con un porcentaje de entre 10% y 20% a la producción total de cobre en el mundo.

Biooxidación

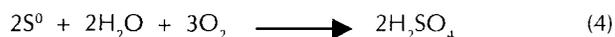
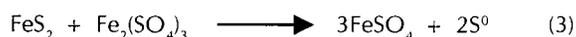
El oro presente en algunos minerales puede ser recuperado en un circuito gravimétrico ó directamente por cianuración, pudiéndose alcanzar hasta un 90% de recuperación de oro.

En cambio, los minerales refractarios de oro, en donde el oro y la plata están encapsulados dentro de minerales sulfurados tales como la pirita y la arsenopirita, no pueden ser recuperados gravimétricamente y responden muy pobremente al proceso de cianuración.

Los métodos tradicionales de tratamiento previo para liberar el oro como son la oxidación por medio de la tostación (conversión de sulfuros en sulfatos solubles) y la lixiviación a presión, no son satisfactorios, no sólo por consideraciones económicas sino más aún por consideraciones ambientales.

La biooxidación resulta ser una de las alternativas utilizadas a nivel industrial en el pre-tratamiento de minerales refractarios sulfurados que contienen oro. La biooxidación del mineral provoca la liberación del oro de la matriz sulfurada, pone en solución al mineral sulfurado, dejando al oro expuesto en la fase sólida, para posteriormente ser recuperado mediante métodos convencionales tales como la cianuración⁶.

La química de la oxidación bacteriana de los minerales de oro puede ser representada por las siguientes ecuaciones, utilizando la pirita y la arsenopirita como ejemplos^{7,8,9,10}.



Estos minerales representan las mayores fuentes de minerales de oro refractario.

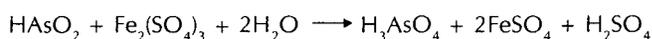
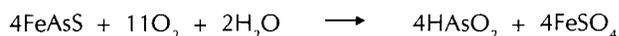
Estas reacciones demuestran la habilidad del *T. Ferrooxidans* para (1) oxidar el mineral directamente, y (2) oxidar los iones ferrosos producidos por la oxidación del mineral ó por reducción química del ión férrico, y (3) oxidar el azufre producido por la oxidación del mineral.

La química de la lixiviación biológica de la arsenopirita ha sido interpretada en varias formas por muchos autores. En cualquier caso las reacciones asociadas a la oxidación de la arsenopirita guardan estrecha relación con las reacciones de oxidación de la pirita. Aunque hay que recalcar la importancia que tiene la producción vía bacteria del sulfato férrico, que juega un importante rol en las reacciones de oxidación de la arsenopirita, y que representa un factor crítico para la eliminación del arsénico al medio ambiente, en su forma más estable y menos tóxica (arsénico pentavalente). La oxidación biológica de la arsenopirita, y la formación de arsénico pentavalente, puede ser representada por la siguiente reacción:

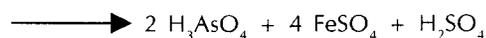
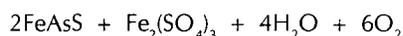


El sulfato ferroso producido en esta reacción es posteriormente oxidado según la reacción (2) para producir sulfato férrico.

Podría formarse arsénico trivalente como un producto intermedio, el cual será oxidado a su forma pentavalente por el ión férrico.



También puede producirse la oxidación de la arsenopirita por el sulfato férrico.



En muchas menas refractarias, el oro puede estar distribuido en diferentes proporciones en más de un mineral. Mas aún, habiendo sólo un mineral la distribución no homogénea del oro puede estar asociada al carácter estructural de la red cristalina del mineral.

En el primer caso, diferentes minerales sulfurados tendrán diferente solubilidad dependiendo de su potencial, en una mezcla de pirita-arsenopirita, la arsenopirita de oxidará más rápidamente debido a su potencial más bajo. Si el oro está asociado al mineral más activo, se podrá liberar el oro sin necesidad de oxidar el mineral pasivo.

En el segundo caso la selectividad de la oxidación biológica se debe a un aumento en la actividad en zonas específicas dentro del mineral, causadas por pequeñas variaciones en la composición, distorsiones estructurales del cristal y otros efectos mineralógicos.

Otro caso particular de mineral refractario incluye a aquellos que contienen materiales carbonosos, los que de manera similar a los sulfuros refractarios encapsulan al oro haciendo que su recuperación por métodos gravimétricos ó cianuración sea muy inferior. Un problema adicional es que, aún cuando el oro en el material carbonoso pueda encontrarse libre, este material puede adsorber el oro cianurado, este efecto se denomina "preg-robbing". Se ha investigado el uso de un proceso bacterial para incrementar la recuperación del oro de estos minerales, utilizando una bacteria heterótrofa, que oxide ostensiblemente al carbón.

Perspectivas

La ventaja de la biolixiviación es que permite reducir costos de producción, además de ser un método ambientalmente más eficiente, promoviendo así una industria minera limpia, sustentable y competitiva.

A pesar de que la biooxidación puede no ser adecuada para el tratamiento de todos los minerales refractarios las oportunidades para su aplicación son inmensas en muchas áreas del mundo.

Es así como este proceso, iniciado por Gencor y conocido mundialmente como BIOXTM, está siendo empleado en diferentes partes del mundo, como en Uzbekistán en la mina de oro Amantaytau Gold, en Grecia en el Proyecto Olimpia, Australia en Perseverante Explorations Fosterville Mine, ASARCO Australia en la operación Wiluna en el oeste de Australia y proyecta incluir muchas áreas más del África, Estados Unidos y Canadá.

Se abre una nueva perspectiva que sería el tratamiento de los óxidos metálicos, mediante procesos anaeróbicos, donde la bacteria reduce al óxido metálico para luego disolverlo. Paralelamente, la recuperación de silicatos y carbonatos empleando bacterias heterótrofas¹².

Igualmente se están haciendo estudios con bacterias termófilas para la lixiviación de concentrados sulfurados, debido particularmente a su habilidad en la lixiviación de chalcopiritas recalcitantes.

Referencias

1. Rossi, G.; *Biohydrometallurgy*, Mc Graw – Hill Book Company, 1990, capítulo 1.
2. Misari F.S.; *Biohidrometallurgia-Tecnología de la Lixiviación Bacteriana de Minerales*, 1987, pp. 43, Lima Perú
3. Sand W.; Gehrke T.; Jozsa P.G.; Schippers A.; *Hydrometallurgy*, **2001**, 59, 159-175
4. Lawrence R.W.; *Biotechnology in the Mining Industry-Fundamental and Applied Aspects of Processes for Metal Extraction*, en *Advances in Bioprocess Engineering*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
5. Loayza C.; Troncoso C.; Curso de Biolixiviación de Minerales de Oro y Cobre – Tecsup, Lima, 1993.
6. Lindström E. Börje; Gunneriusson E.; Tuovinen Olli H.; *Critical Reviews in Biotechnology*, **1992**, 12(1/2), 133-155.
7. Ehrlich H.L.; Brierley C.L.; *Mineral Microbial Recovery*, McGraw-Hill, New York, **1990**, 127-148.
8. Ly M. E. – Aplicaciones Ambientales de la Biotecnología en la Industria, Curso dictado en la Pontificia Universidad Católica del Perú (Agosto 2002). Lima.
9. Ly M. E.; Loayza C; Biolixiviación de arsenopirita aurífera a la planta Tamboraque, Primer Encuentro Internacional sobre Metalurgia del Oro, Nov 1999, Lima, Perú.
10. Lawrence R.W.; Branion R.M.R.; Ebner H.G.; *Fundamental and Applied Biohydrometallurgy*, Elsevier Science Publishing Company Inc., 1986, 115-126.
11. Van Aswegen P.C.; Marais H.J.; *Minerals & Metallurgical Processing*, **1999**, November, 16:4.
12. Ehrlich Henry L. *Hydrometallurgy*, **2001**, 59, 127-134
13. www.puc.cl/ru/81/pdf/81_dossier_2pdf. El Negocio de los bichitos, Revista Universitaria N° 81/2003.