

LIXIVIACIÓN MICROBIANA

X. VÁZQUEZ CAMPOS

xvazquezc@gmail.com

Alumno 4º Biología, Materia: Microbiología Aplicada (2005-06). Universidade de Vigo

Profesora: Carmen Sieiro.

modelo de filogenia, basada principalmente en datos moleculares y ultraestructurales (Fig. 3).

Resumen: La lixiviación microbiana o biolixiviación es un proceso mediante el cual, utilizando microorganismos, se extraen los metales a partir de las rocas que los contienen. Consiste en la conversión de un metal insoluble, normalmente en forma de sulfuro, en una forma soluble, normalmente como sulfato. Es un proceso complejo llevado a cabo por una comunidad microbiana acidófila entre la que destacan los géneros *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum* y *Acidiphilium*.

Resumo: A lixiviación microbiana ou biolixiviación é un proceso polo cal, empregando microorganismos, extraense os metais a partir das rochas que os conteñen. Baséase na conversión dun metal insoluble, xeralmente en forma de sulfuro, nunha forma soluble, xeralmente como sulfato. É un proceso complexo levado a cabo por unha comunidade microbiana acidófila entre a que destacan os xéneros *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum* e *Acidiphilium*.

INTRODUCCIÓN

Desde la obtención de la primera patente biominera por Kennecott Copper Corporation en 1958, han aparecido numerosos términos en la bibliografía para definir estos procesos. El término biolixiviación o lixiviación microbiana hace referencia a la conversión de un metal insoluble, normalmente en forma de sulfuro, en una forma soluble, normalmente como sulfato, y todo ello mediado por la acción de microorganismos, especialmente bacterias oxidantes del hierro y del azufre. Cuando esto ocurre, el metal es extraído en agua. Por ello, algunos autores adjudican el sinónimo de biohidrometalurgia a este proceso, de forma análoga a la hidrometalurgia convencional.

Además, como estos procesos son oxidaciones, también pueden denominarse biooxidación. Sin embargo, el término biooxidación se usa normalmente para referirnos a procesos en los que la recuperación del metal se incrementa gracias a la descomposición microbiana de la matriz mineral en la que se encuentra inmerso, pero el metal que se está recuperando no es solubilizado. Así ocurre en el caso de la recuperación del oro a partir de arsenopirita, en el que el metal ha de extraerse en un proceso posterior por disolución en cianuro. Por tanto, el término biolixiviación es, en este caso, un tanto inapropiado, pues no son los microorganismos los que solubilizan el oro. Aquí, se prefiere el término genérico de biominería para referirse a ambos procesos.

A pesar de toda esta amplia y quizás confusa terminología, se suele emplear el término biominería en sentido amplio para englobar a todos estos procesos y en sentido estricto a los que ocurren en reactores, mien-

tras que se adjudica biolixiviación al proceso llevado a cabo al "aire libre".

APLICACIONES

En el proceso minero

Debido a la alta eficacia con la que los microorganismos implicados en estos procesos separan al metal del resto de la roca madre, se han conseguido realizar explotaciones económicamente rentables a partir de yacimientos con concentraciones de metal tan bajas que por los tradicionales métodos físico-químicos de extracción supondrían pérdidas de gran cuantía. Además, es viable la reapertura de antiguas minas que fueron abandonadas debido a que los filones principales ya se encontraban agotados para la explotación de depósitos submarginales.

En el caso de yacimientos con una riqueza de metal media-baja, con la biolixiviación se consigue incrementar el rendimiento de la extracción hasta valores cercanos al 95% o incluso mayores, algo impensable por métodos tradicionales como la pirometalurgia o la hidrometalurgia. En el proceso más extendido, la biolixiviación de cobre, se obtiene un metal de una pureza del 99,99%, muy superior a los del cobre electrolítico (99,1%) o el catódico (90%). Por otra parte, se reducen enormemente los costes de producción: los reactores o pilas de mineral apenas necesitan control; no se precisan las ingentes cantidades de energía necesarias para el tueste y/o reducción de la mena; no hay gastos en la compra de carbón de coque, aluminio, monóxido de carbono, etc., necesarios para reducir los distintos óxidos; no hace falta transportar el material de un lugar a otro, el proceso de recuperación del metal se hace

en el mismo sitio, o prácticamente en el mismo; y, con algunos procesos, se pueden obtener metales incluso a partir de silicatos.

A todo esto se le añaden otras ventajas como que en muchos casos el material obtenido previo al purificado tiene una mayor pureza y en ocasiones ya es posible utilizarlo como tal.

Actualmente, la biominería no sólo supone una alternativa, sino que constituye una realidad. Del millón de Tm de cobre producidas anualmente por USA a finales de los 90', el 25% procedía de la biominería. En Chile, país en el que se calculan las mayores reservas mundiales de cobre, unos 150 millones Tm, aproximadamente 147 millones, se

presentan en yacimientos de baja riqueza que sólo son rentables si se extraen por estos procedimientos. En Sudáfrica, una parte considerable del oro, también se extrae así.

MICROORGANISMOS EMPLEADOS

Los procesos de lixiviación microbiana son de los pocos procesos industriales llevados a cabo por microorganismos en los que nunca se inocula el medio, salvo en el caso de los, cada vez más frecuentes, procesos biomineros llevados a cabo por bacterias u hongos heterótrofos. Los microorganismos presentes en el mineral durante el procesamiento son los que están presentes y componen de forma natural la comunidad biológica de ese hábitat.

Todos estos microorganismos son acidófilos estrictos, la mayoría no crecen o incluso se lisan a partir de valores de pH entre 4-6 según la bacteria. Sus pHs óptimos de crecimiento están en torno a 1,5-2,0. En ocasiones se añaden suplementos de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y KH_2PO_4 , o fertilizantes con fosfato y amonio, para asegurar un buen y rápido crecimiento.

Entre los microorganismos más importantes implicados en estos procesos destacamos los siguientes: *Acidithiobacillus ferrooxidans* (antes *Thiobacillus ferrooxidans*). Es quimiolitotrofo obligado, aerobio estricto y mesófilo (no crece a partir de los 42° C). Se desarrolla sobre pirita, azufre y gran número de sulfuros minerales de manera natural (Figs. 1A y B). Pequeñas cantidades de materia orgánica inhiben de manera importante su crecimiento. A pesar de tener un crecimiento óptimo alrededor de los 30-35° C, esta bacteria se adapta con facilidad a otros rangos de temperatura. Oxida tanto hierro ferroso como azufre en distintos esta-

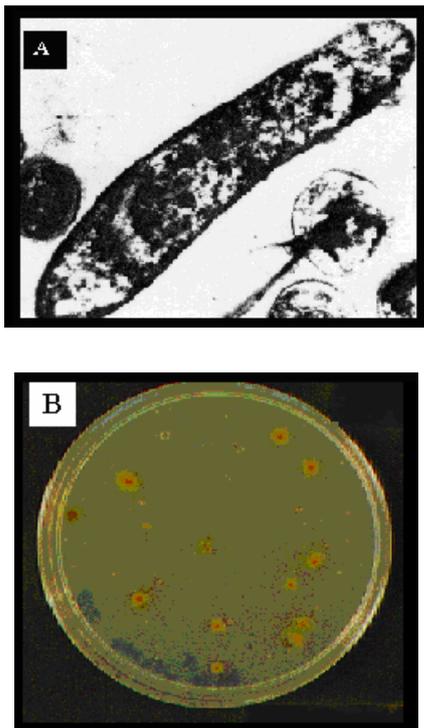


Fig. 1. *Acidithiobacillus ferrooxidans*. A) Micrografía electrónica. B) Bacteria creciendo en un medio que contiene hierro (II); Obsérvese el color rojo-naranja debido a la producción de hierro (III) al oxidar *At. ferrooxidans* el hierro (II). Tomada de "A microbial biorealm page on the genus *Thiobacillus*" (<http://mirobewiki.kenyon.edu/index.php/Thiobacillus>).

dos de oxidación, así como algunos sulfuros metálicos. Presenta gran resistencia a altas concentraciones de metales. Ha sido el más estudiado de todos los microorganismos que participan en este proceso, aunque en algunas publicaciones le otorgan un papel casi secundario.

Acidithiobacillus thiooxidans (antes *Thiobacillus thiooxidans*). También quimiolitotrofo obligado, es mucho más resistente a valores bajos de pH, crece incluso a pHs de 0,5. A diferencia de *At. ferrooxidans*, es incapaz de oxidar hierro, por lo que su papel fundamental es la oxidación del azufre y la acidificación del medio.

Leptospirillum ferrooxidans. Es quimiolitotrofo obligado, oxida hierro ferroso de sulfuros minerales como única fuente de energía. Es aerobio, acidófilo obligado y sensible a materia orgánica.

El género *Acidiphilium* engloba diversos quimiorganótrofos o quimiolitótrofos acidófilos o ácido-tolerantes que a bajas concentraciones de oxígeno pueden emplear Fe^{3+} como aceptor de electrones, regenerando el Fe^{2+} necesario para *At. ferrooxidans* y *L. ferrooxidans*. Se encuentra creciendo frecuentemente cerca de bacterias acidófilas oxidantes de Fe y/o S, aprovechando los residuos orgánicos producidos por éstas o por el lisado de células. Una única especie de todo el género, *Acidiphilium acidophilum* (antes *Thiobacillus acidophilus*), es capaz de crecer de forma autótrofa empleando azufre inorgánico reducido, heterótrofa usando distintas fuentes de carbono o mixótrofa haciendo acopio de ambos recursos.

PROCESO DE LIXIVIACIÓN DEL HIERRO

Este proceso, a diferencia del biolixiviado del cobre, no tiene como fin la extracción de hierro. Esto es debido a que es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre y como tal, está presente en casi todas las rocas y forma muchos minerales explotables por métodos tradicionales. Sin embargo, su conversión a hierro férrico constituye un agente oxidante ideal para la extracción de otros metales.

Acidithiobacillus ferrooxidans oxida la pirita (FeS_2) por contacto formando sulfato ferroso como se muestra en las reacciones [1], [2] y [3] de la Tabla 1.

Así se produce el hierro férrico necesario para realizar el resto de las reacciones, tanto para recuperar el metal que se desea obtener como para seguir acidificando el medio, proceso que lleva a cabo fundamentalmente *At. thiooxidans* pues compite y desplaza a *At. ferrooxidans* de la oxidación del azufre. Este proceso se puede llevar a cabo por 2 vías: la del tiosulfato y la del polisulfuro.

En el mecanismo del tiosulfato, el hierro (III) es reducido por acción de las bacterias, que toman sulfuros metálicos insolubles en medio ácido como la pirita (FeS_2) o la molibdenita (MoS_2) como aceptores de electrones (concretamente, el Fe^{3+} y el S), con el tiosulfato como intermediario y sulfato como principal producto final (reacciones [4] y [5] de la Tabla 1).

Por otra parte, el mecanismo de polisulfuro se basa en la disolución de otros sulfuros minerales (no de hierro), solubles en medio ácido como la esfalerita (ZnS), la calcopirita ($CuFeS_2$) o la galena (PbS), por reacción con hierro férrico y protones, con azufre mo-

	Reacción	Tipo
1	$4 \text{FeS}_2 + 14 \text{O}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{FeSO}_4 + 4 \text{H}_2\text{SO}_4$	Bacteriana
2	$4 \text{FeSO}_4 + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$	Bacteriana
3	$4 \text{FeS}_2 + 15 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$	Bacteriana
4	$\text{FeS}_2 + 6 \text{Fe}^{3+} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 7 \text{Fe}^{2+} + 6 \text{H}^+$	Bacteriana
5	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 8 \text{Fe}^{3+} + 5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-} + 8 \text{Fe}^{2+} + 10 \text{H}^+$	Bacteriana
6	$\text{MS} + \text{Fe}^{3+} + \text{H}^+ \rightarrow \text{M}^{2+} + 0,5 \text{H}_2\text{S}_n + \text{Fe}^{2+} \quad (n \geq 2)$	Bacteriana
7	$0,5 \text{H}_2\text{S}_n + \text{Fe}^{3+} \rightarrow 0,125 \text{S}_8 + \text{Fe}^{2+} + \text{H}^+$	Bacteriana
8	$0,125 \text{S}_8 + 1,5 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$	Bacteriana

Tabla 1. Reacciones que se suceden durante el lixiviado del hierro. Aunque algunas pueden ocurrir químicamente, el efecto catalizador de las bacterias es considerablemente más importante.

lecular como principal intermediario. El azufre formado es relativamente estable pero puede ser oxidado a sulfato por bacterias oxidantes de azufre (reacciones [6], [7] y [8] de la Tabla 1).

Las grandes cantidades de hierro ferroso producidas por la descomposición del mineral se pueden volver a oxidar a hierro (III) tal como muestra la reacción [2] (Tabla 1), que se utilizará para la recuperación de otros metales, especialmente el cobre. Asimismo, se liberan partículas de azufre coloidal que son aprovechadas por las bacterias, produciendo más ácido como indica la reacción [8] (Tabla 1).

PROCESO DE LIXIVIACIÓN DEL COBRE

Se utiliza para la obtención de cobre a partir de minerales como la calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S), bornita (Cu_5FeS_4) y covellina (CuS). Estos minerales pueden descomponerse por acción bacteriana o por reacción con el sulfato férrico del medio. En el caso de acción microbiana, las bacterias responsables son: *At. ferrooxidans* o, en el caso de los minerales con hie-

rrero, también *Leptospirillum ferrooxidans*. La descomposición por acción microbiana de la calcopirita, calcosina y covellina se muestran en las reacciones [9], [10] y [11] de la Tabla 2 respectivamente, así como las reacciones por acción del hierro férrico ([12], [13] y [14], Tabla 2).

Durante estas reacciones, el azufre elemental se deposita como una capa protectora sobre el mineral, parando el proceso, pero es rápidamente eliminado por las bacterias oxidantes de azufre como en la reacción [8] (Tabla 1).

Una vez la fase líquida del lixiviado pasa por el mineral y se disuelven en ella los subproductos formados, se hace pasar esta disolución a través de residuos de hierro, limaduras o por electrodos de hierro, de manera que se produce una reacción redox espontánea (reacción [15] de la Tabla 2) que precipita el cobre.

Así, el líquido resultante rico en hierro (II) se rectifica a $\text{pH} = 2$, y es, en la mayoría de los casos, reconducido a un tanque de oxidación que contiene la gran mayoría de las bacterias que intervienen en el proceso. En

	Reacción	Tipo
9	$2 \text{CuFeS}_2 + 8,5 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{CuSO}_4 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O}$	Bacteriana
10	$2 \text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{CuS} + 2 \text{CuSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	Bacteriana
11	$\text{CuS} + 0,5 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O} + 0,125 \text{S}_8$	Bacteriana
12	$\text{CuFeS}_2 + 2 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{CuSO}_4 + 5 \text{FeSO}_4 + 0,25 \text{S}_8$	Química
13	$\text{Cu}_2\text{S} + 2 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow 2 \text{CuSO}_4 + 4 \text{FeSO}_4 + 0,125 \text{S}_8$	Química
14	$\text{CuS} + 2 \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow \text{CuSO}_4 + 2 \text{FeSO}_4 + 0,125 \text{S}_8$	Química
15	$\text{CuSO}_4 + \text{Fe}^0 \rightarrow \text{Cu}^0 + \text{FeSO}_4$	Química

Tabla 2. Reacciones que se suceden durante el lixiviado de cobre.

este tanque se produce la mezcla ácida para el lixiviado, que posteriormente se hace discurrir de nuevo sobre el mineral.

Dentro de la biolixiviación existen otros procesos bien desarrollados y en activo como la extracción de uranio y de oro. Actualmente están en desarrollo procesos innovadores que emplean directamente bacterias cianogénicas como *Chromobacterium violaceum*, para que, entre otros proyectos, recuperen las ingentes cantidades de oro de la chatarra electrónica.

LOS MÉTODOS: IRRIGACIÓN Y TANQUES DE LIXIVIACIÓN

En biominería existen básicamente dos formas básicas de explotación: la irrigación o los tanques de lixiviación. En cualquiera de los métodos empleados, el molido del mineral hasta un grano más o menos fino es indispensable para una buena actuación de las bacterias.

Irrigación

El fundamento de estos métodos es la circulación de manera más o menos continua del líquido de lixiviado.

Lixiviación en pendiente (*dump leaching*):

la traducción del término original sería lixiviación de escombreras, pues es apto para la extracción de material a partir de escombros de antiguas explotaciones (mineral submarginal). El mineral se tritura y amontona en la ladera de una montaña. Con una bomba se rocía el mineral y el líquido enriquecido se recoge en la parte inferior de la ladera y se trata para la recuperación del

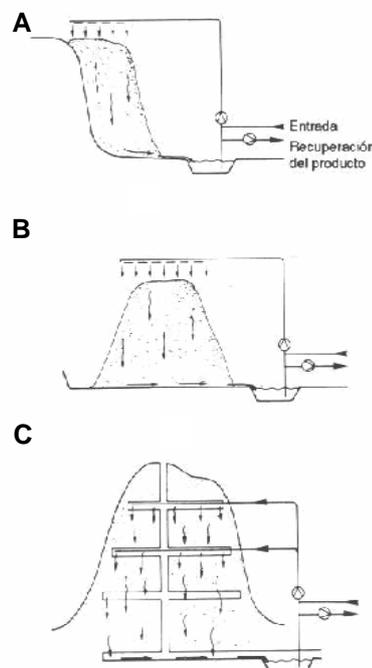


Fig. 2. Lixiviación mediante irrigación. A) Lixiviación en pendiente. B) Lixiviación en pilas. C) Lixiviación "in situ". Tomada de Crueger y Crueger, 1993.

mineral. El agua se reutiliza después para la regeneración de las bacterias en un estanque de oxidación (Fig. 2A).

Lixiviación en pilas (*heap leaching*): se irriga de manera similar al lixiviado en pendiente. Se emplea para mineral de bajo grado (Fig. 2B).

Lixiviación en cubas o estanques (*vat leaching*): se construyen unos diques dentro de los cuales se deposita el mineral. La zona se asfalta antes de construir los diques para evitar pérdidas de líquido. El sistema de irrigación apenas cambia. Es similar al anterior.

Lixiviación in situ (*in-situ leaching*): el agua con bacterias se inyecta directamente en la mena no extraída que previamente se ha perforado por múltiples lugares. Es viable realizarlo en pozos de minas que ya no se explotan. Es frecuente que para aumentar la permeabilidad de la roca, se introduzcan cargas explosivas en el suelo que contiene el mineral. En este proceso es recomendable que a cierta profundidad exista una capa de roca impermeable que impida el escape del lixiviado. Para recuperar el mineral se bombea el líquido desde lo más profundo de la explotación. Normalmente también se introducen unas sondas que inyectan aire en el mineral, pues la anoxia y ausencia de dióxido de carbono en esta metodología aparecen con facilidad. Se usa para tratamiento de mineral submarginal (Fig. 2C).

Tanques de lixiviación

Son típicos reactores biológicos, aunque suelen ser algo más pequeños. Se emplean casi exclusivamente en la biominería del oro. La suspensión mineral es trasladada sucesivamente de un tanque a otro. En es-

tos tanques sólo se controla el pH y que la aireación sea buena. El último tanque al que se llega es un tanque de decantación. Al líquido se le ajusta el pH por última vez y se lleva a depurar. El sólido decantado es donde está el oro.

BIBLIOGRAFÍA

BARIACH, D. 2005. A microbial biorealm page on the genus *Thiobacillus*. <http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/thiobacillus>.

BRIERLEY, J.A. & BRIERLEY, C.L. 2001. Present and future commercial applications of biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy* 59:233-239.

CASTRO, I.M., FIETTO, J.L.R., VIEIRA, R.X., TRÓPIA, M.J.M., CAMPOS, L.M.M., PANIAGO, E.B. & BRANDÃO, R.L. 2000. Bioleaching of zinc and nickel from silicates using *Aspergillus niger* cultures. *Hydrometallurgy* 57:39-49.

CRUEGER, W. & CRUEGER, A. 1993. *Bioteconología: manual de microbiología industrial*. 3ª edición. Acribia D.L. Zaragoza.

EFE. 2002. Empresa chileno-japonesa mejorará procesos biológicos en minería. *Finanzas.com* 10 julio (párrafo 5). <http://www.finanzas.com/id.4130435/noticias/noticia.htm>.

FARAMARZI, M.A., STAGARS, M., PENSINI, E., KREBS, W. & BRANDL, H. 2004. Metal solubilization from metal-containing solid materials by cyanogenic *Chromobacterium violaceum*. *Journal of Biotechnology* 113:321-326.

GARRITY, G.M. 2001. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. 2nd edition. Springer. New York.

GLAZER, A.N. & NIKAIIDO, H. 1995.

Microbial biotechnology. Fundamentals of applied microbiology. W.H. Freeman and Company. New York.

MOFFAT, A.S. 1994. Microbial Mining Boosts the Environment, Bottom Line. *Science* 264:778-779.

MUÑOZ, J.A., GONZÁLEZ, F., BLÁZQUEZ, M.L. & BALLESTER, A. 1995. A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part I: A review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores. *Hydrometallurgy* 38:39-57.

RAWLINGS, D.E. 2002. Heavy Metal Mining Using Microbes. *Annu. Rev. Microbiol.*

56:65-91.

RAWLINGS, D.E. 2005. Characteristics and adaptability of iron- and sulphur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. *Microbial Cell Factories* 4:13.

RAWLINGS, D.E., TRIBUTSCH, H. & HANSFORD, G.S. 1999. Reasons why "Leptospirillum"-like species rather than *Thiobacillus ferrooxidans* are the dominant iron-oxidizing bacteria in many commercial processes for the biooxidation of pyrite and related ores. *Microbiology* 145:5-13.