

BIOLIXIVIACIÓN

“Bacterias come Piedras”

La Biolixiviación es un proceso de recuperación de metales a partir de la acción de bacterias que permite el aprovechamiento de mineral sulfurado de baja ley.

En el sector minero-metalúrgico, **la biotecnología se utiliza como una herramienta en la disolución y recuperación de los valores metálicos contenidos en los minerales.** La mayoría de los procesos microbianos se emplean en la lixiviación de cobre y uranio, en el mejoramiento de la extracción de los metales preciosos contenidos en sulfuros refractarios y en el tratamiento de aguas residuales.

Índice temático

I. FUNDAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA BIOLIXIVIACIÓN	3
Proceso minero	3
Oxidación de hierro (Fe)	4
Mecanismos de lixiviación bacteriana	5
Lixiviación indirecta	5
Lixiviación directa	5
Condiciones ambientales necesarias	6
pH	6
Oxígeno y CO ₂	6
Nutrientes	6
Fuente de energía	6
Luz	6
Temperatura	6
Presencia de Inhibidores	6
Bacterias asociadas a la lixiviación de minerales	7
Biooxidación de sulfuros	7
Oxidación de la pirita	7
Oxidación de sulfuros de cobre	8
Oxidación de sulfuros de metales preciosos	8
Biorrecuperación de metales	8
Precipitación	8
Biosorción	8
Reducción	9
Ventajas de la tecnología microbiana sobre los métodos no biológicos	9

I. FUNDAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA BIOLIXIVIACIÓN

La posibilidad de **aprovechar millones de toneladas de mineral cuprífero de descarte** acumulado por decenas de años de operación minera incentivó a los investigadores a comienzos del siglo XXI.

En la búsqueda de nuevos procesos, más baratos y eficientes, fue desarrollado el uso de bacterias lixiviantes que permiten separar el cobre de los minerales sólidos con los que se encuentra mezclado, haciendo rentable su procesamiento.

La técnica utilizada se denomina *oxidación bacteriana*, se aplica en el tratamiento de minerales sulfurados auríferos y se basa en **la acción efectiva de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*** (T.ferrooxidans)

para oxidar especies reducidas de azufre a sulfato y para oxidar el ion ferroso a ion férrico.

El *Thiobacillus ferrooxidans* es eficaz en ambiente ácido, aeróbico, móvil y quimioautotrófico, presentándose en forma de bastoncitos de 1-2 micrones de largo por 0.5-1.0 micrones de ancho. Presentan un punto iso eléctrico en torno de 4.0 – 5.0 y se desenvuelven en el intervalo de temperatura de 28 °C a 35 °C. La fuente de energía fundamental para el *Thiobacillus ferrooxidans* es el ion Fe+2, pudiendo ser utilizado también el azufre en sus formas reducidas. La bacteria usa nutrientes básicos para su metabolismo a base de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y como elementos de trazo, magnesio (Mg) y calcio (Ca).

Proceso minero

La Biolixiviación de sulfuros como proceso biohidrometalúrgico involucra un conjunto de reacciones químicas, metabólicas, enzimáticas y no enzimáticas, en las cuales **el mineral insoluble es oxidado y otros metales de interés son liberados en solución.**

Actualmente, los siguientes procesos microbiológicos son de importancia en la hidrometalurgia:

- Oxidación de sulfuros, azufre elemental y hierro ferroso.
- Producción de compuestos orgánicos, peróxidos, etc., por microorganismos organotróficos, los que atacan minerales oxidando o reduciendo los elementos con valencia variable.
- Acumulación de elementos químicos o en su precipitación por microorganismos.



OXIDACIÓN DE HIERRO (FE)

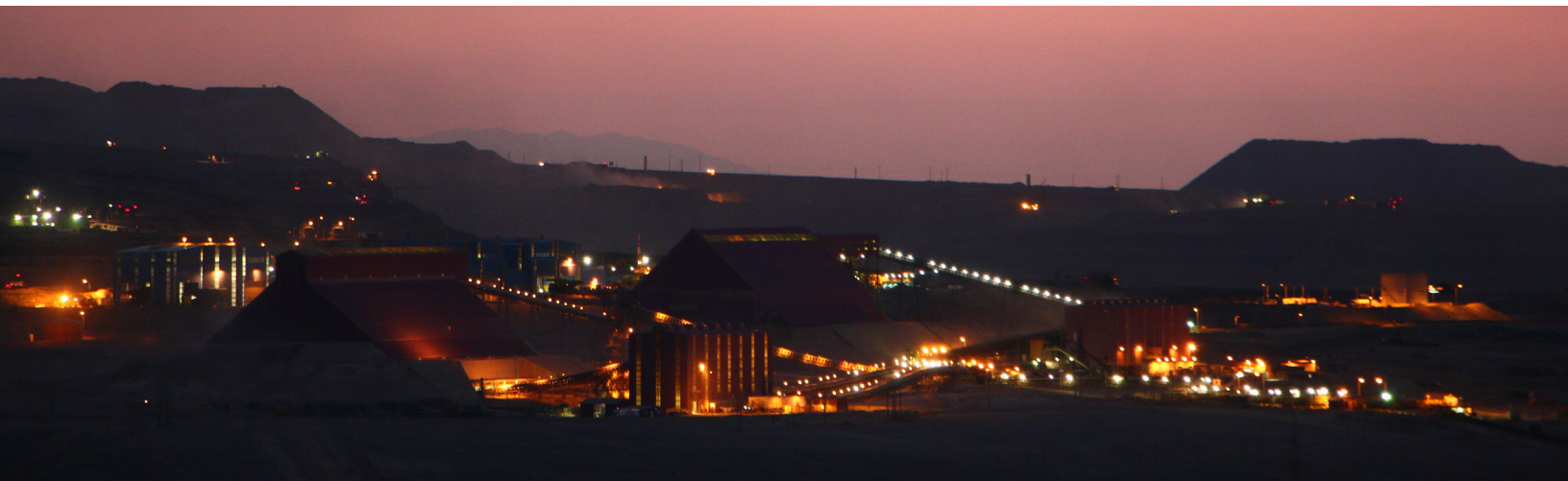
La reacción de oxidación del Fe²⁺ es:



Esta reacción es importante para la lixiviación de metales pues permite la acumulación de biomasa bacteriana en minerales y soluciones, además de obtener una fuerte oxidación de muchos sulfuros y producir un alto potencial redox en el medio.

LA BACTERIA ES CAPAZ DE OXIDAR LOS SIGUIENTES SULFUROS

Pirita y Marcasita: FeS ₂	Petlandita: (Fe, Ni) ₉ S ₈
Pirrotita: FeS	Violadita: (Ni, Fe) ₃ S ₄
Calcopirita: CuFeS ₂	Bravoíta: (Ni, Fe)S ₂
Bornita: CuFeS ₄	Milerita: NiS
Covelina: CuS	Polidimita: Ni ₃ S ₄
Tetrahedrita: Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	Antimonita: Sb ₂ S ₃
Enargita: CuAsS ₂	Molibdenita: MoS ₂
Arsenopirita: FeAsS	Escalerita: ZnS
Realgar: As ₄ S ₄	Marmatita: (Zn, Fe)S
Orpimentra: As ₂ S ₃	Galena: PbS
Cobaltito: CoAsS	Geocronita: Pb ₅ (Sb, As ₂)S ₈ Ga ₂ S ₃



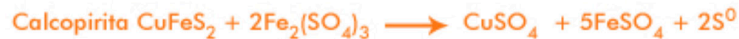
MECANISMOS DE LIXIVIACIÓN BACTERIANA

Los principales involucrados en el proceso de lixiviación bacteriana son:

LIXIVIACIÓN INDIRECTA

Este tipo de lixiviación se realiza con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ en ausencia de oxígeno o de bacterias. Es responsable de la disolución o lixiviación de varios minerales sulfurados de importancia económica.

Dentro de este mecanismo, son importantes dos reacciones mediadas por T. ferrooxidans:



El mecanismo de lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2). El azufre (S^0) generado en las reacciones 3 y 4 puede ser convertido en ácido sulfúrico (H_2SO_4) por T. ferrooxidans según:



Este ácido sulfúrico mantiene el pH del sistema a niveles favorables para el desarrollo de la bacteria.

LIXIVIACIÓN DIRECTA

Las bacterias ferrooxidantes también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente, sin la participación del sulfato férrico producido biológicamente. El proceso se describe en la siguiente reacción, donde M representa un metal bivalente:



Dado que el hierro siempre está presente en ambientes de lixiviación natural, es posible que tanto la lixiviación indirecta como la directa ocurran de manera simultánea.

MECANISMOS DE LIXIVIACIÓN BACTERIANA

El efecto de ciertos factores ambientales sobre el desarrollo y crecimiento de las bacterias juega un rol importante dentro del proceso de lixiviación bacteriana, por lo que es muy importante el control de factores como el pH, la presencia de oxígeno, la temperatura, la influencia de la luz, los requerimientos nutricionales, el tamaño de partículas y el efecto de inhibidores, entre otros.

PH

En general, los T. ferrooxidans se desarrollan bien en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollarse sobre Fe^{+2} a un pH mayor de 3.0. Los tiobacilos se desarrollan normalmente sobre valores que se ubican dentro del rango de pH 1.5 a 2.5.

Oxígeno y CO_2

La disponibilidad de oxígeno es un factor que controla la extracción de metales por bacterias. No se conoce otro oxidante que pueda ser utilizado por los microorganismos en ambientes de lixiviación. El dióxido de carbono es utilizado como fuente de carbono para la fabricación de su arquitectura celular.

Nutrientes

Como todos los seres vivos, los T. ferrooxidans requieren de fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo. Estos son amonio, fosfato, azufre, iones metálicos (como Mg^{+}), etc. El magnesio, es necesario para la fijación de CO_2 y el fósforo es requerido para el metabolismo energético.

Fuente de energía

Los T. ferrooxidans utilizan como fuente primaria de energía los iones ferroso y azufre inorgánico. El hierro ferroso debe ser suplementado al medio cuando se trata de medios sintéticos. En caso de utilizar mineral, no es necesario añadir Fe^{+2} .

Luz

La luz visible y la no filtrada tienen un efecto inhibitorio sobre algunas especies de *Thiobacillus*, pero el hierro ofrece alguna protección a los rayos visibles.

Temperatura

El rango sobre el cual se desarrollan se encuentra entre los 25 °C y 35 °C.

Presencia de Inhibidores:

En los procesos de Molienda o por acción propia del agente lixivante, se liberan algunos iones que en ciertas concentraciones resultan tóxicas para las bacterias ferrooxidantes afectando su desarrollo. La literatura señala que los niveles de tolerancia de las bacterias para ciertos metales es $Zn^{+2} = 15 - 72$ g/l; $Ni^{+2} = 12 - 50$ g/l; $Cu^{+2} = 15$ g/l; $Ag = 1$ ppb; $UO_2^{+2} = 200 - 500$ mg/l, entre otros.

BACTERIAS ASOCIADAS A LA LIXIVIACIÓN DE MINERALES

Microorganismos	Fuente energética	pH	Temperatura (°C)
Thiobacillus ferroxidans	Fe ⁺² , U ⁺⁴ , S ⁰	1.5	25 - 35
Thiobacillus thiooxidans	S ⁰	2.0	25 - 35
Leptospirillum ferroxidans	Fe ⁺²	1.5	25 - 35
Sulfolobus	S ⁰ , Fe ⁺² , C orgánico	2.0	> a 60
Acidiphilium cryotum	C orgánico	2.0	25 - 35
Th. intermedius	S ⁰ , S ⁻² , C orgánico	2.5	30
Th. Napolitanas	S ⁰ , S ₂	2.8	30
Th. Acidophilus	S ⁰ , S ⁻²	3.0	
Th. Thioparus	S ⁰ , S ⁻²	3.5	
Thiobacillus TH2 y TH3	Fe ⁺² , S ⁻²	6.0	50
Metallogenium sp.	Fe ⁺²	4.5	
Heterotrofos	C orgánico		25 - 40

BIOOXIDACIÓN DE SULFUROS

Muchos sulfuros metálicos pueden ser atacados por acción bacteriana, dando lugar a la producción de los correspondientes sulfatos solubles. Para sulfuros refractarios de oro y metales del grupo del platino, el ataque bacteriano resulta ser un pretratamiento.

OXIDACIÓN DE LA PIRITA

La pirita (FeS₂) es un sulfuro ampliamente distribuido y se puede hallar en asociación con muchos metales: cobre, plomo, zinc, arsénico, plata, oro, entre otros. Su oxidación da lugar a la formación de sulfato férrico y ácido sulfúrico (Reacciones 1 y 2).

OXIDACIÓN DE SULFUROS DE COBRE

La oxidación biológica de sulfuros de cobre ha sido el proceso más estudiado. El cobre se disuelve transformándose en sulfato de cobre (CuSO_4). La calcopirita (CuFeS_2) es el sulfuro de cobre más difícil de oxidar. Bajo la influencia de los T. ferrooxidans, la velocidad de oxidación de este sulfuro se incrementa hasta en 12 veces más que el proceso netamente químico. Los sulfuros secundarios de cobre-calcocita (Cu_2S), novelita, bornita, son oxidados más fácilmente bajo el impacto de las bacterias (Reacciones 3 y 4).

OXIDACIÓN DE SULFUROS DE METALES PRECIOSOS

La lixiviación bacteriana se emplea para romper la matriz del sulfuro (principalmente piritita y/o arsenopiritita) en la que se encuentra “atrapada” la partícula aurífera, permitiendo la posterior recuperación de la misma por cianuración convencional. En realidad, el proceso resulta un pretratamiento antes que una disolución directa del metal.

BIOOXIDACIÓN DE SULFUROS

A través de la hidrometalurgia, se puede realizar la recuperación de los metales presentes en las soluciones, así como el tratamiento de las aguas residuales de las diferentes industrias, en cumplimiento de rigurosas normas ambientales. Existen muchos microorganismos con capacidad para realizar adsorción o precipitación de metales. Las siguientes son algunas de las formas en las que los microbios recuperan estos metales.

- **Precipitación**

La precipitación de metales bajo la forma de sulfuros involucra el empleo de bacterias sulfato-reductoras para producir H_2S , que tiene la capacidad de precipitar prácticamente la totalidad del metal contenido en una solución. Debemos hacer notar que el proceso se realiza en ausencia de oxígeno (anaerobiosis) en contraposición a la biooxidación de sulfuros, que requiere de oxígeno (proceso aeróbico).

- **Biosorción**

Las investigaciones sobre la biosorción de metales a partir de soluciones, señalan que la habilidad de los microorganismos permitiría recuperar hasta el 100% de plomo, mercurio, zinc, cobre, níquel, cobalto, etc., a partir de soluciones diluidas. El empleo de hongos hace posible recuperar entre el 96% y 98% de oro y plata. También se ha demostrado que cepas de *Thiobacillus* son capaces de acumular plata, lo que permitiría recuperar este metal a partir de aguas residuales de la industria fotográfica. La biosorción de metales conduce a la acumulación de estos en la biomasa. El mecanismo involucra a la pared celular. En los hongos, la adsorción de metales se encuentra localizada en las moléculas de quitina y quitosán. Por otro lado, el cobre puede ser recuperado a partir de óxidos, por hongos que producen ácidos orgánicos que forman complejos con el cobre.

- **Reducción**

La reducción microbial de metales implica una disminución en la valencia del metal. En algunos casos, la reducción es parcial (el metal reducido aún exhibe una carga neta), mientras que en otros, el ion metálico es reducido a su estado libre o metálico

VENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA MICROBIANA SOBRE LOS MÉTODOS NO BIOLÓGICOS

- Requiere poca inversión de capital, ya que las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas.
- Presenta bajos costos en las operaciones hidrometalúrgicas, en comparación con los procesos convencionales.
- Implica una menor polución o contaminación ambiental durante el proceso.
- Permite el tratamiento de creciente stock de minerales de baja ley que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales.