

## Lixiviación Bacteriana

**Jaime Simpson**

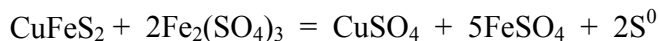
Los minerales oxidados de cobre más fáciles de lixiviar son los sulfatos (chalcantita) y sulfatos básicos (antlerita y brochantita), luego los carbonatos (malaquita y azurita), la atacamita y la tenorita, que requieren la presencia de ácido sulfúrico y no forman ninguna capa de producto sólido. En general, la química de las especies de cobre es esencialmente por descomposición química, a temperatura y presión ambiente, obteniéndose productos de reacción solubles en soluciones acuosas ácidas. Una excepción es la cuprita en cambio necesita la presencia de un oxidante (el oxígeno contenido en el aire puede ser este oxidante) para disolverse completamente; los silicatos de cobre son los que tienen una cinética de lixiviación más lenta.

En el caso de los sulfuros, se trata de reacciones más complejas que involucran la presencia de reactivos oxidantes para lograr su disolución. La formación de azufre elemental a raíz de la reacción química, provoca una cinética de lixiviación extremadamente lenta.

Las reacciones químicas de los sulfuros de cobre son en general de tipo electro químicas, entre las que destacan las siguientes:

### **Sulfuros:**

1) Disolución de la Calcopirita:



2) Disolución de Covelina:



Como se puede observar en las reacciones electroquímicas de la disolución de sulfuros de cobre, se forma azufre elemental que forma una capa de producto sólido que inhibe la velocidad de la reacción química. Esta capa de producto sólido (que corresponde a azufre elemental) no es conductora, compacta e hidrofóbica. En la figura 1 se puede observar un esquema didáctico que ejemplifica el caso de la calcopirita.

Como se observa en la figura 1, la reacción de la calcopirita con ión férrico involucra una transferencia de electrones que reduce el ión férrico a ferroso, formándose a la vez, el azufre elemental como producto sólido y desprendiendo ión cúprico y ión ferroso como productos en solución. Después de algunas horas, la capa de producto sólido, cubre las zonas de reacción y el proceso se detiene, dado que el azufre es impermeable y no conductor.

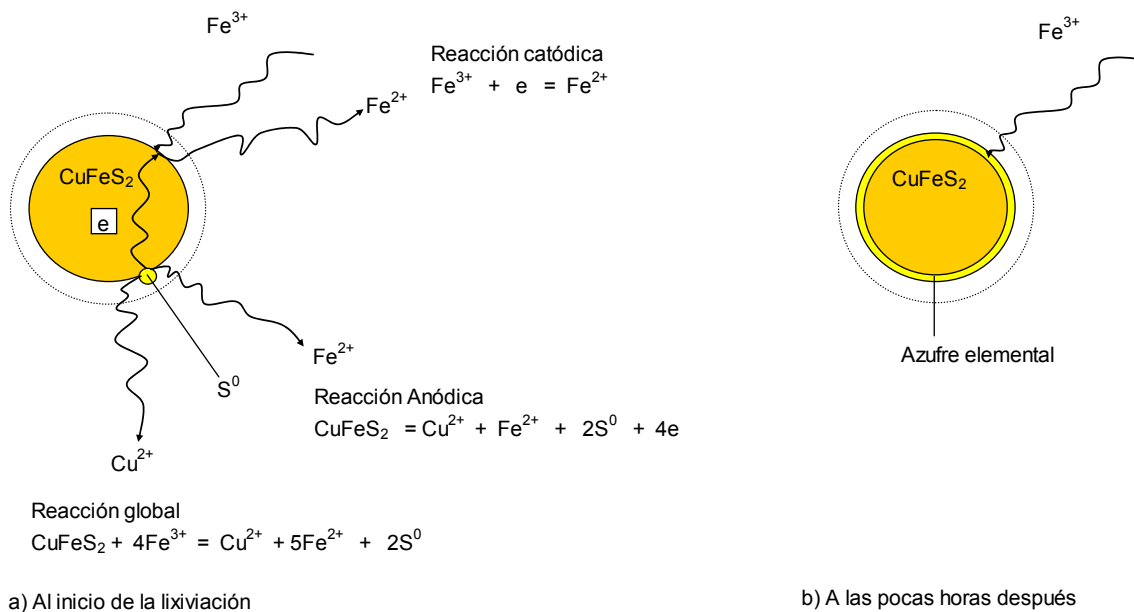


Figura 1.- Disolución de calcopirita.

La forma de acelerar el proceso es removiendo o cambiando las propiedades físicas de la capa de producto sólido, o bien, manteniendo una elevada concentración de ión férrico que permita mejorar la difusión del ión férrico a través de la capa de producto. Una de las formas para lograr estos efectos es con la **lixiviación bacteriana**, que **incrementa la velocidad** de oxidación de Fe(II) a Fe(III) en **un millón** de veces. También las bacterias actúan sobre el azufre elemental y directamente sobre el mineral.

Se ha encontrado que hay bacterias que viven naturalmente en los minerales de cobre (en general donde se detecta la presencia de azufre, existen bacterias) y que transforman los sulfuros en sulfatos. Las bacterias son organismos unicelulares de 1 micra de tamaño (1 micra = 0.001mm). Esta acción de las bacterias puede ser directa, en presencia de agua y oxígeno, o puede ser indirecta, ya que estas bacterias generan ácido sulfúrico y oxidan el sulfato ferroso a sulfato férrico, que como se ha visto ambos son agentes lixiviantes para el cobre soluble y algunas especies sulfuradas. Generalmente se aplica a botaderos compuestos por lastres mineralizados mediante la inyección de soluciones débilmente aciduladas, sobre la superficie del mineral acopiado, donde a la solución de riego se le carga con un inóculo, que es un cultivo de bacterias relativamente concentrado, con el propósito de acelerar la multiplicación de las bacterias en el mineral. En la figura 2 se observan bacterias actuando sobre la superficie del mineral.

En los últimos tiempos, la Biotecnología se ha convertido en una alternativa viable para la extracción de los valores presentes en las menas, así como para la recuperación de metales presentes en soluciones acuosas contaminantes. En el sector minero metalúrgico, los procesos biotecnológicos han logrado ser aplicados con éxito en la lixiviación de cobre y uranio, y en el pre-tratamiento de sulfuros auríferos refractarios.

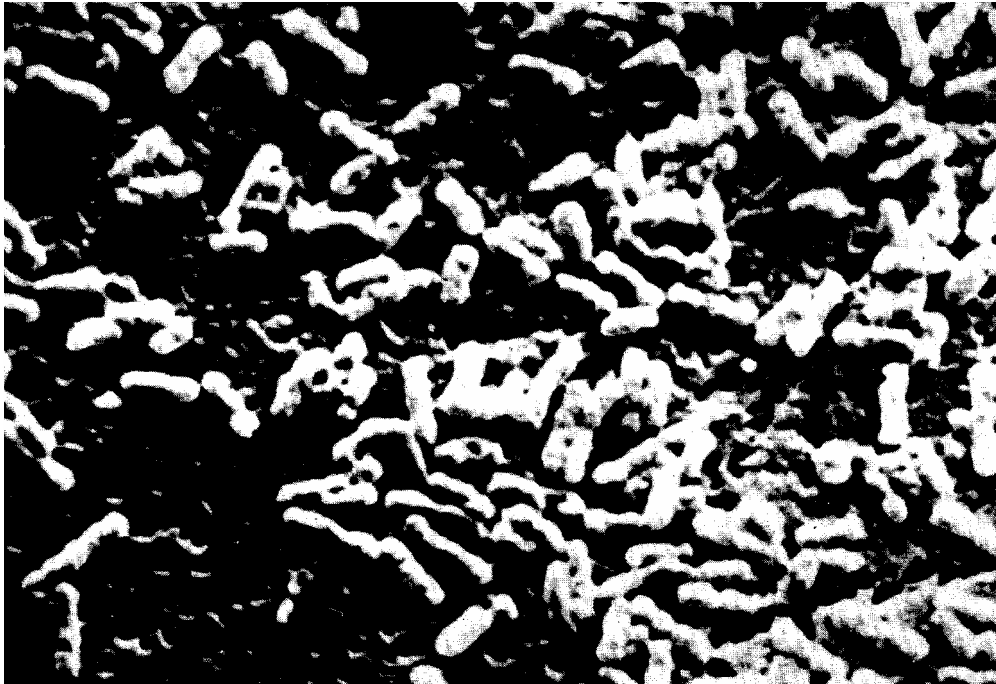


Figura 2 Bacterias actuando sobre la superficie de un mineral.

El empleo de sistemas biológicos en los procesos industriales, conocida como Biotecnología, ha sido usada desde tiempos inmemoriales en la producción de vino, cerveza, pan, en la fabricación de antibióticos, en la industria alimenticia, entre otras aplicaciones. En el sector minero metalúrgico, la biotecnología ha sido utilizada como una herramienta en la disolución y recuperación de los valores metálicos contenidos en menas. Mayormente, los procesos microbianos han sido empleados en la lixiviación de cobre y uranio, en el mejoramiento de la extracción de metales preciosos contenidos en sulfuros refractarios, y en el tratamiento de aguas residuales.

El enorme potencial que representa el empleo de bacterias en los procesos mineros se grafica con la afirmación que en 1979 brindara el Dr. Richard Manchee al respecto: "...una planta de extracción de minerales del futuro podría tener el aspecto de una actual de tratamiento de agua: libre de la suciedad y de los montones de escorias asociadas con las operaciones mineras, mientras que bajo el suelo millones de microbios realizarían las tareas que en nuestros días se caracterizan por el rugido de las máquinas, el ruido de las picotas y el traslado de mineral".

La Lixiviación Bacteriana, también conocida como Biolixiviación, Biohidro-metalurgia o Biooxidación de Sulfuros, puede ser definida como un proceso natural de disolución que resulta de la acción de un grupo de bacterias - principalmente del género *Thiobacillus* - con habilidad de oxidar minerales sulfurados, permitiendo la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos. Por mucho tiempo, se pensó que la disolución o lixiviación de metales era un proceso netamente químico, mediado por agua y oxígeno atmosférico. El descubrimiento de bacterias acidófilas ferro- y sulfo-oxidantes ha sido primordial en la definición de la lixiviación como un proceso catalizado biológicamente.

En términos más globales, se puede señalar que la biolixiviación es una tecnología que emplea bacterias específicas para lixiviar, o extraer, un metal de valor como uranio, cobre, zinc, níquel y cobalto presente en las menas o en un concentrado mineral. El producto final de la biolixiviación es una solución ácida que contiene el metal valor en su forma soluble. De otro lado, el término biooxidación es un utilizado para describir un proceso que emplea bacterias para degradar un sulfuro, usualmente pirita o arsenopirita, en la que el oro o la plata, o ambos, se encuentran encapsulados.

La tecnología microbiana presenta ventajas sobre los métodos no biológicos, entre los que podemos encontrar:

1. Requiere poca inversión de capital (las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas).
2. Bajos costos de operación necesarios para las operaciones hidrometalúrgicas en comparación con los procesos convencionales.
3. Relativa ausencia de polución o contaminación ambiental durante el proceso.
4. El tratamiento del creciente acumulo de minerales de baja ley en las minas los que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales.

## ASPECTOS MICROBIOLOGICOS

### **Thiobacillus ferrooxidans:**

Los microorganismos que son responsables de la disolución de los metales a partir de minerales son, principalmente, organismos quimiosintéticos y autotróficos pertenecientes al género Thiobacillus, aunque como señalamos en un párrafo y tabla anterior, no es la única. De las especies de Thiobacillus que se conocen la que más atención ha recibido es Thiobacillus ferrooxidans, cuya presencia fue demostrada por Colmer y Hinkle, a comienzos de los años 50, en el drenaje unas minas de carbón, que reportaban altos contenidos de ácido y fierro.

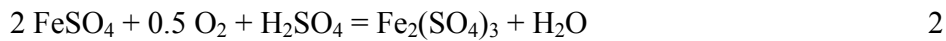
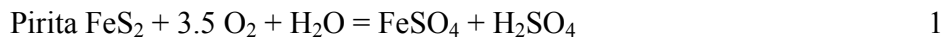
T. ferrooxidans presenta forma bacilar, gram negativas, de 0.5 a 1.7  $\mu$ , algunas cepas tienen flagelos, es quimioautotrófico, capaz de oxidar compuestos inorgánicos como iones ferroso (Fe(II)) y azufre, los que le sirven de fuente primaria de energía. El carbono necesario para su arquitectura celular lo obtiene por fijación de CO<sub>2</sub>, de manera similar a las plantas verdes (Ciclo de Calvin-Benson). Es aerobio (requiere de O<sub>2</sub> como aceptor final de electrones), acidófilo (desarrolla en rangos de pH que varían entre 1.5 y 3.0), y a temperaturas que oscilan entre 25-35°C. Es considerada como el mayor contribuyente en la producción de aguas ácidas que drenan de depósitos de metales sulfurados, gracias a la capacidad que tienen de oxidar minerales de piritas, generando soluciones ácidas de sulfato férrico.

### **Mecanismos de Lixiviación**

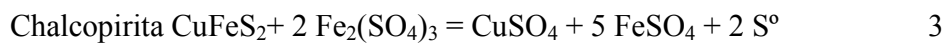
Los principales mecanismos involucrados en el proceso de lixiviación bacteriana son: directa e indirecta.

a.- Lixiviación Indirecta:

Dos reacciones importantes mediadas por T. ferrooxidans son:



El sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurados. La lixiviación con  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  recibe el nombre de lixiviación indirecta porque se realiza en ausencia de oxígeno o de bacterias y, es responsable de la disolución o lixiviación de varios minerales sulfurados de cobre de importancia económica:



El mecanismo de lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2). El azufre ( $\text{S}^\circ$ ) generado en las reacciones 3 y 4 puede ser convertido en ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) por T. ferrooxidans según:



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

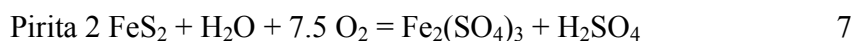
b.- Lixiviación Directa:

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.

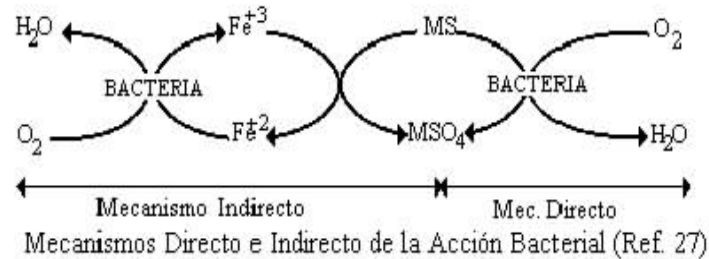
bacteria



bacteria



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.



### Desarrollo Bacteriano

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

- pH: En general los T. ferrooxidans, desarrollan bien en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollar sobre  $Fe^{+2}$  a un pH mayor de 3.0. Normalmente los valores sobre el que los tiobacilos se desarrollan se ubican dentro del rango de 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, T. ferrooxidans requiere de fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, entre las que tenemos fuente de  $N_2$  (amonio), de fósforo, de S, iones metálicos (como  $Mg^+$ ), etc. Magnesio, es necesario para la fijación de  $CO_2$  y el fósforo es requerido para el metabolismo energético. Los medios de cultivo empleados presentan estos requerimientos, siendo los más importantes el 9K y el TK.
- 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 férrico ofrece alguna protección a los rayos visibles.
- Temperatura: El rango sobre el cual se desarrollan se encuentran entre  $25^\circ C$  y  $35^\circ C$ .
- 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 el desarrollo bacteriano. 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.

Otros microorganismos de importancia:

Dentro de este grupo y estrechamente asociados a T. ferrooxidans se encuentran a:

- Thiobacillus thiooxidans: Se lo puede encontrar en depósitos de azufre y sulfurosos, desde donde es fácil aislarlos. Se caracteriza porque sólo es capaz de oxidar azufre. Desarrollan a temperatura entre 5°C y 40°C, a un pH en el rango de 0.6 a 6.0, siendo el óptimo 2.5. Son aerobios estrictos.
- T. acidophilus: Fue aislado por primera vez por Markosyan en 1973 a partir de minerales, describiéndolo con el nombre de T. organoparus. Presentan forma bacilar, son aerobios estrictos, oxida azufre y utiliza compuestos orgánicos como parte de sus requerimientos nutricionales.
- Tiobacilos semejantes a termófilos: Aunque no están bien estudiadas, es reconocida su importancia en los procesos hidrometalúrgicos. Muestran un activo crecimiento sobre medios conteniendo  $Fe^{+2}$  y sulfuros en presencia de extracto de levadura.
- Leptospirillum ferrooxidans: Son vibriones en forma de espira, como pseudococos. Móviles por la presencia de un flagelo polar simple. Las colonias sobre silica gel son pequeñas y de color marrón rojizo debido a la formación de hierro férrico. Son aerobios estrictos y quimioautotróficos obligados. Utiliza  $Fe^{+2}$  y  $FeS_2$  como fuente energética.
- Sulfolobus: Son bacterias gram negativas, que se presentan como células esféricas, con lóbulos, inmóviles, y la ausencia de flagelos y endosporas. Su pared celular carece de mureina.

MICROORGANISMO	FUENTE ENERGETICA	pH	TEMPERATURA (°C)
Thiobacillus ferrooxidans	$Fe^{+2}$ , $U^{+4}$ , $S^0$	1.5	25 - 35
Thiobacillus thiooxidans	$S^0$	2.0	25 - 35
Leptospirillum ferrooxidans	$Fe^{+2}$	1.5	25 - 35
Sulfolobus	$S^0$ , $Fe^{+2}$ , C orgánico	2.0	> a 60
Acidiphilium cryptum	C orgánico	2.0	25 - 35
Th. intermedius	$S^0$ , $S^{-2}$ , C orgánico	2.5	30
Th. napolitanus	$S^0$ , $S^{-2}$	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

Bacterias asociadas a la Lixiviación de Minerales (Ref. 6 y 29)

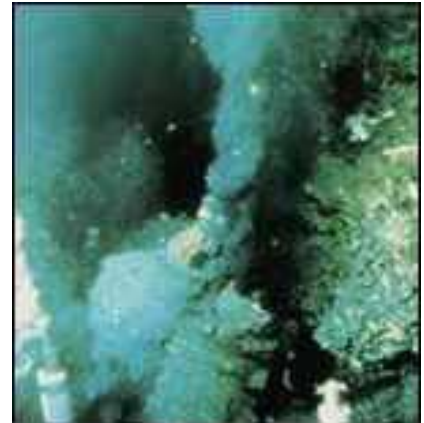


Figura 3 La Mayoría de las bacterias han sido aisladas desde fuentes hidrotermales

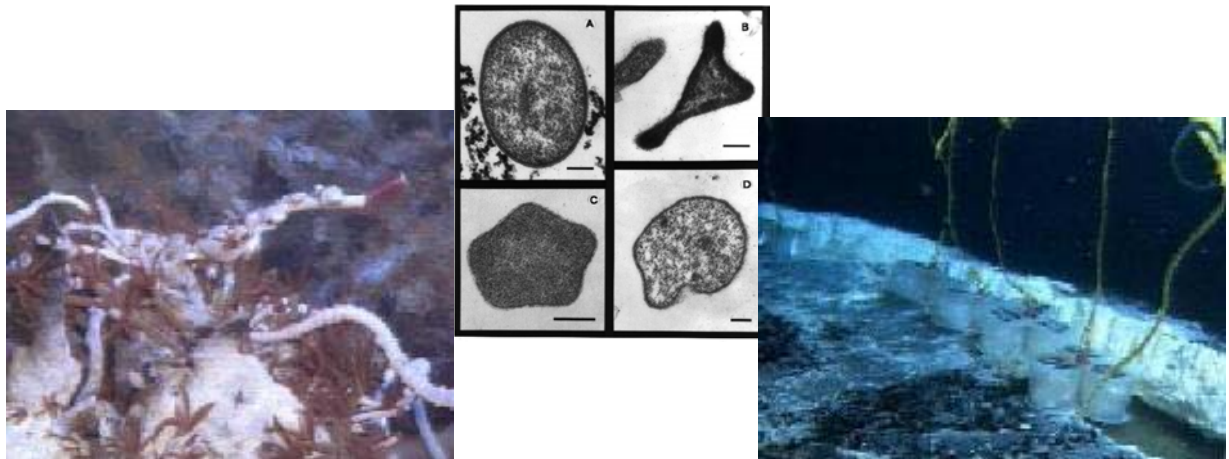


Figura 4 Constituyen la fuente primaria de alimentos en estos sitios.

## APLICACION DE LOS PROCESOS BIOTECNOLOGICOS

### Biooxidación de Sulfuros

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

- Oxidación de la Pirita: La pirita ( $\text{FeS}_2$ ) es un sulfuro ampliamente distribuido y se lo puede hallar en asociación con muchos metales como 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).

Proyecto, Ubicación	Tipo & Tamaño	Tecnología Aplicada	Historia
Fairview, Sud Africa	Oro, 35 tm/ día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1986, en operación
Sao Bento, Brazil	Oro, 150 tm/día	GENMIN, una fase de tanque agitado previo al autoclave	Construido en 1990, en operación
Harbour Lights, Australia	Oro, 40 tm/día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1992, paralizado en 1994
Wiluna Mine, Australia	Oro, 115 tm/día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1993, en operación
Sansu, Ghana	Oro, 1000 tm/día	GENMIN, tanque agitado	Construido en 1994, ampliado en 1995, en operación
Youanmi, Australia	Oro, 120 tm/día	BACTECH, tanque agitado	Construido en 1994, en operación
Lo Aguirre, Chile	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Iniciado en 1980, paralizado en 1996
Cerro Colorado, Chile	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Construido en 1993, en operación
Quebrada Blanca, Chile	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Construido en 1994, en operación
Ivan-Zar, Chile	Cu, lixiviación en pilas	Soc. Minera Pudahuel, biopilas	Construido en 1994, en operación
Mt, Leyshon, Australia	Cu/Au, lixiviación en pilas	Biopila de capa delgada más cianuración	Construido en 1992, en cierre
Girilambone, Australia	Cu, lixiviación en pilas	Biopila	Construido en 1993, en operación
Newmont-Carlin, USA	Oro, lixiviación en pilas	Biopila y cianuración	Construido en 1995, en operación
Toquepala, Perú	Cu, lixiviación de botaderos	Dumps	Iniciado en 1996, en operación
Tamboraque, Perú	Oro, 60 tm/día	BIOX, tanque agitado	Construido en 1998, en operación y producción

- **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 ( $\text{CuSO}_4$ ). La chalcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) es el sulfuro de cobre más difícil de oxidar. Bajo la influencia de *T. ferrooxidans* la velocidad de oxidación de este sulfuro ase incrementa hasta en 12 veces más que el proceso netamente químico. Los sulfuros secundarios de cobre -chalcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelita, bornita-, son oxidados más fácilmente bajo el impacto de las bacterias (Reacciones 3 y 4). A nivel industrial, la tecnología ha venido siendo aplicada en pilas (Chile, USA, Perú, etc.). Southern Perú viene aplicando la tecnología para la recuperación de cobre en sus botaderos de sulfuros de baja ley de Toquepala. Más recientemente, Billiton, de Sudáfrica, realiza investigaciones para recuperar el cobre contenido en minerales arsenicales, en un proceso que ha denominado BIOCOP.
- **Sulfuros de Metales Preciosos:** La lixiviación bacteriana se emplea para romper la matriz del sulfuro (principalmente, pirita y/o arsenopirita) en la que se encuentra "atrapada" la partícula aurífera, permitiendo la posterior recuperación de la misma por cianuración convencional. Realmente, el proceso resulta siendo un pretratamiento antes que una disolución directa del metal. Los procesos industriales han tenido enorme aplicación, entre los que destacan: el proceso BIOX, de Gencor, y que tiene plantas como la de Ashanti con capacidad para tratar hasta 1000 tpd de mineral.

### **Plantas de Biooxidación en Operación**

- **Sulfuros de Zinc:** La acción bacteriana de sulfuros de zinc también ha sido evaluada, y aunque no se conoce de plantas comerciales su aplicación tiene un enorme potencial. La marmatita es el sulfuro de zinc más fácil de oxidar, influenciado enormemente por la presencia de hierro.
- **Sulfuros de Plomo:** La lixiviación bacteriana de galenita origina la formación de  $\text{PbSO}_4$  que es insoluble en medio ácido, característica que puede ser empleada en la separación de algunos valores metálicos acompañantes en una mena de plomo.
- **Sulfuros de Níquel:** El níquel es lixiviado a partir de sulfuros (pentandlita y milerita) y de menas de hierro en presencia de *T. ferrooxidans* de 2 a 17 veces más rápido que el proceso netamente químico.
- **Sulfuros de Antimonio:** Se conocen de algunos trabajos que reportan la habilidad de *T. ferrooxidans* de oxidar antimonita ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) a pH 1.75 y a 35°C. También se reporta la capacidad de *B. thioparus* y *T. thiooxidans* de oxidar este sulfuro.
- **Sulfuros de Metales Raros:** Los metales raros se presentan en la parte cristalina de muchos sulfuros o silicatos. Para liberarlos es necesario oxidar los sulfuros o destruir la matriz de silicato. La literatura reporta la posibilidad de oxidar, empleando bacterias del grupo de *Thiobacillus*, de una variedad de estos metales, entre los que podemos encontrar galio y cadmio presente en la esfalerita (el principal transportador de estos elementos); de germanio y cobalto, de renio, selenio y telurio, titanio y uranio, entre otros.

## **Desulfurización de Carbón**

La presencia de azufre en las menas de carbón constituye un contaminante, cuya eliminación se presenta como un problema, sobre todo desde el punto de vista ambiental. La oxidación biológica de la porción piritosa o sulfurada permitirá eliminar el azufre presente. Muchos trabajos de laboratorio han demostrado que un importante porcentaje (generalmente por encima del 90%) del azufre contenido en la pirita puede ser removido del carbón bituminoso, sub-bituminoso y lignito en periodos de una a dos semanas por *T. ferrooxidans*. También es posible emplear bacterias termófilas del género *Sulfolobus* en la desulfurización de las menas de carbón.

La remoción del azufre orgánico presente en el carbón por vía microbiana es un área de interés por muchas razones. En algunos casos, la presencia de este tipo de azufre representa un porcentaje considerable del azufre total del carbón. Debido a que la efectiva desulfurización del carbón involucra la remoción del carbón orgánico como del inorgánico, los procesos microbianos que operan en condiciones cercanas a las ambientales, presentan innumerables ventajas sobre los métodos químicos y físicos convencionales.

## **Biorecuperación de Metales**

Una tarea importante de la hidrometalurgia es la recuperación de los metales presentes en las soluciones, así como el tratamiento de las aguas residuales de las diferentes industrias, en cumplimiento de las rigurosas normas ambientales. Existen muchos microorganismos con capacidad para adsorber o precipitar metales. Algunas de las formas como los microbios recuperan los metales se detallan a continuación:

- **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 96% a 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. De 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 microbiana 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 ión metálico es reducido a su estado libre o metálico.

MICROORGANISMO	FORMA DE ADSORCIÓN Y PRECIPITACIÓN
Hongos, Levaduras y Bacterias	Biosorción de elementos radioactivos y otros: Al, Ag, Zn, Cr, Ni, Cu, etc.
Chitina y Chitosan	Adsorción de Se, Zr, Hf, Ru de aguas circundantes en un sistema de enfriamiento de un reactor nuclear.
Bacterias Sulfato Reductoras	Precipitación de metales a partir de soluciones.  $C_{org.} + SO_4^- = S^0 + CO_2$  $S^- + Me = MeS$
Bacterias Reductoras	Reducción del metal.

### PERSPECTIVAS FUTURAS

Son numerosas las posibilidades que se presentan para la aplicación de los procesos biotecnológicos en el beneficio de los minerales, algunos de los cuales se reseñará brevemente en las siguientes líneas.

Los microorganismos pueden ser utilizados como agentes floculantes o como colectores en los procesos de flotación de minerales. La capacidad de muchos microorganismos de poder adherirse a superficies sólidas gracias a la interacción existente entre la carga de la pared celular y las condiciones hidrofóbicas, modificando la superficie del mineral permitiendo su flotación y floculación (empleado en la separación de las fases sólida y líquida de una pulpa). Por ejemplo, se ha reporta que una bacteria hidrofóbica es un excelente floculante para un número de sistemas minerales. Los minerales que han podido se floculados con esta organismo incluye a la hematita, ciertos lodos de fosfatos, floculación selectiva de carbón en menas piritosas, entre otras. Igualmente, este microorganismo es buen colector de hematita, y puede ser empleado en reemplazo del colector químico.

Otra área de enorme interés es el empleo de microorganismos heterótrofos, generalmente parte de la flora acompañante de Thiobacillus, como herramienta para la lixiviación de sistemas no sulfurados. Tal es el caso del empleo de un esquema de lixiviación bacteriana heterotrófica para menas lateríticas de baja ley y que permitiría incrementar enormemente las reservas económicamente explotables de níquel. También el empleo de heterótrofos en la lixiviación de menas de manganeso, plata y fosfato podría incrementar el número de reservas para estos commodities importantes. Su empleo radica en la enorme ventaja que significa su rápida velocidad de crecimiento, en comparación con los autótrofos.

La biodegradación de compuestos tóxicos orgánicos representa otro rubro importante de aplicación de los procesos biológicos. Debemos recordar que una amplia variedad de sustancias, tóxicas y no tóxicas, pueden ser descargadas al medio ambiente como consecuencia de las operaciones mineras. Muchos de estos compuestos son productos químicos complejos empleados en flotación y en procesos hidrometalúrgicos. Otros incluyen a productos derivados del petróleo

empleados de manera diversa en las operaciones mineras. Se reporta la capacidad de especies de *Klebsiella* y *Pseudomonas* en la degradación de reactivos de flotación.

Asimismo, se reconoce la habilidad de ciertos microorganismos o de sus enzimas de degradar, bajo ciertas condiciones, cianuro empleado en la recuperación de oro y plata. Ejemplo a nivel industrial de esta aplicación, lo representa la planta de Homestake, en Estados Unidos, que viene funcionando desde 1984, y emplea una cepa nativa de *Pseudomonas*.

También es de potencial importancia el empleo de ciertas especies vegetales en la prospección geológica de yacimientos minerales como en la limpieza y recuperación de suelos contaminados con iones metálicos pesados. Aunque el empleo de plantas u organismos completos escapa a la definición de biotecnología, el uso de estas permitirá centrar su aplicación en áreas donde se tiene depósitos de relaves antiguos o en zonas urbanas caracterizadas por su alto grado de contaminación.

## REFERENCIAS

1. Bauer, J. L., 1986. Lixiviación Bacteriana: Introducción a la parte microbiológica de la Biohidro-metalurgia con sp. de *Thiobacillus*. Revista de la ANBIOP, 3(2): 53-60.
2. Biól. José J. Guerrero Rojas, BIOTECNOLOGIA EN LA DISOLUCION Y RECUPERACION DE METALES. Primer Congreso Peruano de Biotecnología y Bioingeniería, Trujillo, Perú, Noviembre 1998
3. Brierley, J. A., 1990, Biotechnology for the Extractive Metals Industries, JOM, Vol. 40, No. 1, January 1990, pp. 28.
4. Brierley, C. L.; A. P. Briggs, 1997, Minerals Biooxidation/Bioleaching: Guide to Developing an Economically Viable Process. En: PDAC Annual Meeting, Toronto, Canada, March, 1997.
5. Chaudhry, G. R.; R. P. Das, 1987, Bacterial Leaching-Complex Sulphides of Copper, Lead and Zinc. Int. J. of Mineral Processing, 21: 57-64.
6. Gilbert, S. R.; Pounds, C. O.; Dave, S. R.; K. A. Natarajan; J. V. Bhat, 1981, Leaching of Copper and Zinc from Oxidised Ores, Hydrometallurgy, 7: 235-242.
7. Gentina, J. C.; F. C. Acevedo, 1992, Lixiviación Bacteriana de Minerales. En : IV Curso Latinoamericano de Biotecnología , Chile.
8. Gilbert, S. R.; C.O. Bounds; R. R. Ice, 1988. Comparative economics of bacterial oxidation and roasting as a pretreatment for gold recovery from an auriferous pyrite concentrate. CIM Bulletin 81 (910) 89-94.
9. Habashi, F.; 1992, A textbook of Hydrometallurgy, Chapter 8: The Role of Microorganisms. University of Laval, Quebec, Canada. pp 185-189.
10. Harris, L.; J. A. Brierley, 1989, Biotechnology, Mining Magazine, October 1989, pp 301-304
11. Hurtado, J., 1984. Aislamiento, purificación y presencia de plásmidos en cepas nativas de *Thiobacillus ferrooxidans*. Tesis de Magister U.P.C.H., Lima, Perú.
12. Hutchins, S. R. ; Davidson, M. S.; Brierley, J. A.; Brierley, C. L. ,1986. Microorganisms in the reclamation of metals. Ann. Rev. Microbiol. 40:311-336.

13. Khadil, A. M.; B. J. Ralph, 1977, The Leaching of Various Zinc Sulfides with three Thiobacillus Species, GBF-Conference Bacterial Leaching, GBF Monograph Series 4.
14. Loayza, C.; C. Troncoso, 1993, Lixiviación de Minerales, Curso de Actualización, TECSUP, Lima.
15. Lynn, N. S., 1997, The Bioleaching and Processing of Refractory Gold Ore, JOM, Apr97, pp. 24-26.
16. Misari, F.; 1987, Biohidrometalurgia, 1a. Edición, Ed. Lima, Perú.
17. Smith, E. W.; M. Misra. 1991. Mineral Bioprocessing. TMS. Univ. Nevada, USA, 498 pp
18. Mwaba, C. C., 1991, Biohydrometallurgy: An Extraction Technology for the 1990s. Mining Magazine, September 1991, pp. 160 - 161.
19. Olson, G. J.; Kelly, R. M. ,1986. Microbiological metal transformations: Biotechnological applications and potential. Biotechnol. Progress. 2(1): 1-15.
20. Pooley, F.D., 1993, Desarrollos en Bio-hidrometalurgia para el Procesamiento de Minerales. En: XXI Convención de Ingenieros de Minas del Perú. Ica, 1993.
21. Roy Chaudhury, G.; Das, R. P., 1987, Bacterial Leaching - complex sulfides of copper, lead and zinc. Int. J. Min. Process. 21:57-64.
22. Torma, A. E.; G. Legaut, D. Kougioumoutzakis, R. Ouellet, 1974, Kinetics of Biooxidation of Metals Sulfides, Can. J. Chem. Engr., 52:515.
23. Torma, A. E.; K. N. Subramanian, 1974, Selective Bacterial Leaching of a Lead Sulphide Concentrate, Int. J. of Mineral Processing, 1: 125-134.
24. Van Aswegen, P. C.; Haines, A. K., 1988. Bacteria enhance gold recovery. Int. Mining, May 1988, pp. 19-22.