

**COCHILCO**

COMISIÓN CHILENA DEL COBRE

Dirección de Estudios y Políticas Públicas

# **BIOLIXIVIACIÓN: DESARROLLO ACTUAL Y SUS EXPECTATIVAS**

**DE/19/2009**

Registro de Propiedad Intelectual

© N° 187.464

## **Abstracto**

*En los años '80 se aplicó por primera vez en Chile la tecnología de extracción por solvente y electroobtención (SX/EW), cuya irrupción significó una revolución en la producción del cobre, y en pocos años llegó a representar un porcentaje importante de la producción total. Por otra parte, las tecnologías de biolixiviación han permitido recuperar cobre en minerales de baja ley, incrementando así los recursos disponibles. No obstante las tecnologías de biolixiviación han sido aplicadas a la industria del cobre desde los años 80's, su aplicación solo se ha dado a nivel de sulfuros secundarios, siendo el gran desafío pendiente su aplicación a escala industrial en los primarios, en particular en la calcopirita.*

*En este sentido, la biolixiviación aplicada a la calcopirita constituye la próxima revolución tecnológica en la producción de cobre. Por ello, en este estudio se recopila la información sobre la tecnología de biolixiviación y su desarrollo, los avances de la investigación y desarrollo en el país, y las perspectivas de su alcance presente y futuro.*

# INDICE

Abstracto.....	2
<b>1. Introducción.....</b>	<b>4</b>
1.1    Minerales cupríferos.....	4
1.2    Recursos y reservas minerales de cobre .....	4
1.3    Proceso Productivo del cobre .....	5
<b>2. Características de la tecnología de biolixiviación.....</b>	<b>9</b>
2.1    Definición de biolixiviación .....	9
2.2    Características de los microorganismos utilizados.....	9
2.3    Tecnologías de Biolixiviación .....	13
2.4    Ventajas y desventajas de su aplicación .....	15
<b>3. Aplicación de la biolixiviación.....</b>	<b>17</b>
3.1    Desarrollo nacional.....	17
3.2    Investigación y desarrollo.....	20
3.3    Producción Actual.....	21
<b>4. Resumen y conclusiones.....</b>	<b>23</b>
Referencias Bibliográficas.....	<b>25</b>
ANEXOS .....	<b>27</b>

## **1. Introducción**

### **1.1 Minerales cupríferos**

La complejidad de los procesos geológicos que ocurren en la corteza terrestre, hacen que la distribución de los elementos químicos sea heterogénea, generando su enriquecimiento o empobrecimiento. Estos fenómenos pueden originar la concentración selectiva de ciertos elementos en determinadas zonas, con valores que superan la media respecto a la distribución normal de los elementos en la corteza terrestre. A estas zonas de concentración se les conoce como *yacimientos de mineral*.

El origen de los yacimientos de cobre se asocia al magma que asciende introduciéndose en las capas superiores de la corteza, en forma de intrusivos. Este ascenso se relaciona a los diferentes fenómenos que han ocurrido en la corteza desde millones de años atrás, como el fluido de aguas termales y el movimiento de la placa oceánica –Nazca- bajo la continental –Sudamericana-. A partir de estos procesos geológicos se irán formando dos tipos de material mineralizado para los yacimientos de cobre: los *sulfuros* y los *óxidos*.

Inicialmente los minerales se encuentran como sulfuros en las capas profundas de la corteza, al ascender, y debido a la acción del oxígeno atmosférico, se produce una oxidación de estas especies, formando una capa de mineral oxidado, lo que explica que este mineral se encuentre a un nivel más superficial que los sulfurados.

Bajo la capa de mineral oxidado se encuentra una zona llamada secundaria o supérgeno, donde los minerales sulfurados han sido alterados por efecto de la circulación de aguas superficiales, lo que produce la disolución de algunos minerales, generando a la vez el enriquecimiento de sulfuros y con ello el aumento del contenido de cobre. La zona más profunda del yacimiento donde se preservan las características de su formación original, se ubica por debajo de la zona secundaria y se llama zona primaria de sulfuros o hipógena. Los minerales asociados a estas zonas se llaman minerales secundarios y primarios respectivamente (Ver ejemplos en Tabla 3, Anexo).

De este modo, el cobre se encuentra asociado mayoritariamente a minerales sulfurados, y en una menor parte a minerales oxidados. Para su extracción desde los minerales que lo contienen y, debido a que los minerales sulfurados y oxidados tienen características distintas, se requieren procesos productivos diferentes.

### **1.2 Recursos y reservas minerales de cobre**

La explotación del cobre en Chile comenzó desde tiempos inmemorables, pero siempre a pequeña escala. La explotación más industrial comenzó con la llegada del siglo XIX, estimulada por la apertura de la economía nacional debido a los avances de la Revolución Industrial. La explotación sólo se limitaba a los minerales oxidados, por ser de

mayor ley y encontrarse en la superficie, pero con la incorporación de los hornos de reverbero en 1831, que permitieron el procesamiento de minerales sulfurados, la producción de cobre ya se había triplicado para la segunda mitad del siglo (Gana J., 1988).

La producción de cobre se había basado hasta entonces, sólo en el procesamiento de minerales con una alta la ley de corte, y los minerales bajo esta ley eran acumulados cerca de los yacimientos, al igual que los residuos de flotación o relaves. Estos recursos minerales<sup>1</sup>, debido a las grandes cantidades acumuladas junto con su contenido de cobre, comenzaron a ser considerados como una alternativa atractiva de reservas minerales<sup>2</sup> las que podían ser aprovechadas económicamente.

En el caso de los sulfuros de cobre, la existencia de importantes recursos de baja ley, remanentes de la explotación de minerales más ricos, sumado a los primeros indicios de agotamiento de las reservas minerales oxidadas, impulsó a los investigadores a buscar técnicas rentables y eficientes de recuperación del cobre. Esto los llevó a encontrar que ciertas bacterias catalizaban la lixiviación de los minerales sulfurados, haciendo rentable su procesamiento.

La utilización de estas bacterias se justifica cuando el mineral sulfurado de un yacimiento cuprífero es de baja ley o tiene menos de un 0,5% de cobre, situación en la que el proceso productivo tradicional de pirometalurgia deja de ser rentable, y se buscan nuevos procesos, más baratos y eficientes. (CIMM, 2005).

### 1.3 Proceso Productivo del cobre

De acuerdo con las características químicas de los minerales de cobre, las empresas mineras desarrollan tecnologías y procesos diferenciados para la recuperación de cobre a partir de minerales oxidados y sulfurados. Sin embargo, entre ambos procesos productivos existen algunas etapas en común. Los procesos productivos de ambos minerales, se resumen en la Figura 1<sup>3</sup>.

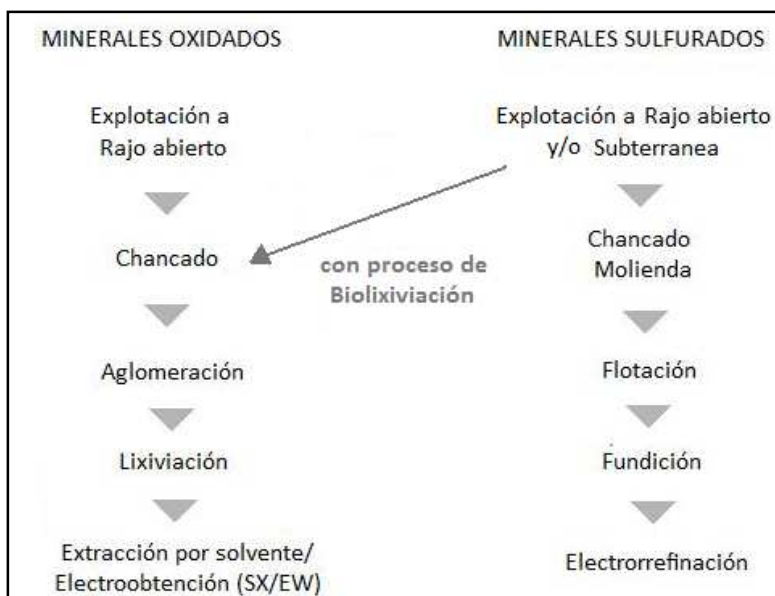
---

<sup>1</sup> Recurso: tonelaje o volumen de roca o mineralización o mineral de interés económico cuyos límites, contenidos, evidencia, continuidad geológica y otras características de cantidad y calidad son conocidas con un grado sustentado de nivel de confiabilidad (Jara, J.J. 2008).

<sup>2</sup> Es una "Porción del recurso" que sometido a estudios técnico-económicos específicos, involucrando continuidad, distribución y extensión de la mineralización, leyes, método de exploración, dilución, procesos metalúrgicos, recuperación, infraestructura, consideraciones ambientales, costos operacionales y costos de capital, demuestran la justificación de su extracción en un período determinado y bajo condiciones bien definidas (Jara, J.J. 2008).

<sup>3</sup> Estos procesos se encuentran enmarcados en la metalurgia extractiva, que estudia los métodos químicos necesarios para tratar una mena mineral o un material que se va a reciclar de tal forma que se pueda obtener, a partir de cualquiera de ellos, el metal, más o menos puro, o alguno de sus compuestos.

**Figura 1.** Proceso Productivo según mineral



Fuente: Elaboración COCHILCO.

#### Proceso minerales oxidados

Los minerales oxidados son explotados principalmente a rajo abierto por encontrarse más cercano a la superficie, y luego son triturados en varias etapas de chancado (generalmente tres) con el objetivo de liberar la especie mineral de interés, en este caso el óxido de cobre, y lograr un tamaño uniforme de partícula de hasta ½ pulgada. En la etapa de aglomeración, una mezcla de agua y ácido sulfúrico se aplica al mineral que puede estar en una correa transportadora o en un tanque agitador, haciendo que los finos se adhieran a los gruesos<sup>4</sup>. Las partículas de menor tamaño segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación, aumentan el tiempo de lixiviación y con ello el consumo de reactivos, razones por las que es importante preparar el material mineralizado, a modo de asegurar su permeabilidad para la lixiviación. La lixiviación es un proceso de la hidrometalurgia<sup>5</sup>, en el cual se aplica una solución de ácido sulfúrico y agua al mineral, lo que cambia las condiciones de acidez disolviendo rápida y selectivamente el cobre con lo cual se separa del mineral. La solución de lixiviación que contiene el cobre disuelto como sulfato de cobre o PLS –Pregnant Liquour Storage- es desarenada y conducida a una planta de extracción por solvente o SX –Solvent Extraction-. Con la extracción por solvente se logra la recuperación selectiva del cobre, su purificación y concentración, mediante la extracción de los iones de cobre con un solvente orgánico, que luego es tratado con una solución ácida en la que se recupera el

<sup>4</sup> "Finos", se refiere a partículas de granulometrías inferiores a 0,1- 0,15 milímetros. "Gruesos", por su parte, se refiere a partículas de granulometría menor a 38 milímetros.

<sup>5</sup> Rama de la metalurgia extractiva, en la cual el elemento de interés es extraído desde una solución acuosa que lo contiene.

metal. De este proceso se obtiene una solución pobre en cobre llamada refino, que se recircula al proceso de lixiviación y una solución ácida purificada y concentrada de cobre que va al proceso de electroobtención o EW –Electrowinning-. Esta última etapa recupera el cobre mediante un proceso electrometalúrgico<sup>6</sup> desde una solución electrolito<sup>7</sup> concentrada, donde se utilizan cátodos de acero inoxidable y ánodos de plomo reutilizables, para producir cátodos de alta pureza de cobre, 99.99% (Vives, H., 2009).

### *Proceso minerales sulfurados*

En el caso de minerales sulfurados se realiza explotación subterránea por la profundidad de los yacimientos y también a rajo abierto para los minerales que se encuentran más cercanos a la superficie. Al igual que para los minerales oxidados, se hacen varias etapas de chancado y además la etapa de molienda donde se reduce el tamaño de las partículas de mineral hasta un máximo de 0,18 mm. El menor tamaño de mineral para los sulfurados se debe a que las partículas deben ser livianas para el proceso de flotación. En la flotación se logra separar el cobre de la ganga<sup>8</sup>, al agregar reactivos que favorecen la adherencia del cobre a burbujas de aire que emergen desde el fondo de una piscina de flotación y la rebasan para luego ser recuperado y secado, antes de ser llevado a la fundición.

La fundición es un proceso pirometalúrgico<sup>9</sup>, en el que el concentrado de cobre pasa del estado sólido al líquido en hornos a 1.200°C, provocando que los elementos más livianos queden en la parte superior del fundido – llamado escoria-, y los pesados como el cobre, se concentren en la base. De la fundición se obtienen ánodos de cobre, que son refinados o purificados por un proceso de electrorrefinación en el que se aplica corriente eléctrica. Se utilizan ánodos de cobre que son consumidos en la reacción, por lo que deben ser repuestos constantemente y cátodos de cobre puro reutilizables, sobre los que se forman los nuevos cátodos de alta pureza (Vives, H. 2009).

En la actualidad, la hidrometalurgia es aplicada a ambos minerales. El inconveniente es que para los minerales sulfurados la cinética de disolución es mucho más lenta que la de minerales oxidados. Por lo tanto, no basta sólo una solución ácida para lograr su disolución, por fuerte que ésta sea, sino que también se requiere un catalizador de la reacción, rol que asumen las bacterias al aplicar la biotecnología para la extracción del cobre, en un proceso llamado *biolixiviación*.

---

<sup>6</sup> Rama de la metalurgia extractiva en la que el metal de interés es extraído utilizando electricidad.

<sup>7</sup> Solución que contiene iones o partículas cargadas eléctricamente, ya sea positiva (catión) o negativamente (anión).

<sup>8</sup> Mineral que forma la roca, no tiene valor económico y acompaña a los minerales metálicos de interés.

<sup>9</sup> Rama de la metalurgia extractiva, en que la obtención y refinación de los metales se produce utilizando calor.

#### 1.4 Biotecnología en el proceso productivo del cobre

El *Convenio sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas* (1992) define biotecnología como "toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos, para usos específicos" (CNDBT, 2003b).

La Biotecnología presenta la ventaja de ser una tecnología específica que permite elegir el campo de aplicación más apropiado a las necesidades y requerimientos del país. Así en el sector minero, la aplicación biotecnológica con más inmediata utilidad es el trabajo con bacterias que participan en la biolixiviación de minerales con contenido de cobre. (CNDBT, 2003)

La rama de la biotecnología que busca el estudio y la aplicación del potencial económico, de las interacciones entre el mundo microbiano y el reino mineral, se llama biohidrometalurgia, un subcampo de la hidrometalurgia<sup>10</sup>.

Esta disciplina se preocupa de dos temas, como son la recuperación de metales por tecnologías de biolixiviación; y la neutralización y purificación de aguas provenientes de los procesos mineros por medio de tecnologías de bioremediación. El objeto de este estudio es el campo de la recuperación de metales, por ello solo será analizada la tecnología de biolixiviación.

---

<sup>10</sup> La palabra biohidrometalurgia significa: bio porque usa microorganismos como bacterias y arqueas, hidro por llevarse a cabo en medio acuoso y metalurgia que es la ciencias que se ocupa de la producción de metales y el tratamiento de materiales y soluciones que contengan metales.



## **2. Características de la tecnología de biolixiviación**

### **2.1 Definición de biolixiviación**

La biolixiviación es un proceso en el cual se emplean microorganismos para disolver los minerales, liberando un metal de valor presente en un mineral o en un concentrado, que con métodos convencionales sería muy difícil de extraer. La biolixiviación es el proceso convencional de lixiviación, catalizado biológicamente pero aplicado a los minerales sulfurados, ante la necesidad de aumentar la cinética de su disolución. De esta manera la biolixiviación es un proceso químico, mediado por el agua y oxígeno atmosférico y un proceso biológico, mediado por microorganismos.

La biolixiviación generalmente se refiere a la tecnología de biominería aplicada a metales base<sup>11</sup>. Los metales base son los metales relativamente fáciles de oxidar o corroer y en el área industrial se refiere a los metales no-ferrosos, que incluye prácticamente a todos los metales a excepción del mismo hierro y su aleación, el acero.

A escala comercial la biolixiviación es aplicada para la recuperación de cobre y uranio por lixiviación y de oro mediante un pretratamiento de minerales refractarios, que recibe el nombre de biooxidación. La tecnología de biolixiviación también ha sido probada en laboratorios para sulfuros de cobalto, galio, molibdeno, níquel, zinc y plomo (Brierley J.A., 2001).

### **2.2 Características de los microorganismos utilizados**

#### **2.2.1 Características de los microorganismos utilizados**

Las bacterias que intervienen en los procesos de lixiviación son generalmente autótrofas<sup>12</sup>, aeróbicas<sup>13</sup> y quimiosintéticas<sup>14</sup>. Esta última característica, las hace capaces de oxidar minerales para producir el ión férrico y ácido sulfúrico, necesarios para las reacciones de biolixiviación. El ión férrico, es un agente fuertemente oxidante, que permite oxidar los minerales de sulfuro de cobre a sulfato de cobre que es soluble. Debido a esto, también se les llama microorganismos sulfo y ferro-oxidantes.

Su capacidad autótrofa les permite sintetizar sus componentes celulares a partir de compuestos inorgánicos, como la fijación del CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Se alimentan de los minerales de los que obtienen energía y realizan esta tarea como parte de sus procesos metabólicos. También se caracterizan por ser organismos que viven en condiciones

---

<sup>11</sup> La biominería es un término genérico que describe el procesamiento de minerales y concentrados que contienen metales usando tecnología microbiológica (Brierley C.L., 2008).

<sup>12</sup> Son organismos capaces de sintetizar todas las sustancias esenciales para su metabolismo a partir de sustancias inorgánicas, de manera que para su nutrición no necesitan de otros seres vivos.

<sup>13</sup> Requieren oxígeno para respirar

<sup>14</sup> Son capaces de obtener la energía necesaria para su metabolismo, a partir de reacciones de oxidación de compuestos inorgánicos reducidos, por lo que también se les llama quimioautótrofos o quimiolitótrofos.

extremas (extremófilos), en este caso, las normales de los minerales: pH ácido y altas concentraciones de metales.

Todas estas características les confieren la clasificación de bacterias y arqueas quimilitoautotróficas ferro-sulfo oxidantes. Uno de sus principales exponentes es la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, aislada por primera vez desde las aguas de una mina de carbón, cuyo descubrimiento se dio a conocer en 1947 (Colmer, A.R. y Hinkle, M.E, 1947). Así fue como se encontró la primera bacteria identificada capaz de lixiviar el cobre.

La *Acidithiobacillus ferrooxidans*, ha sido la bacteria más estudiada para biolixiviación y por consiguiente de la que existe mayor información, sin embargo existen otros microorganismos identificados que solubilizan minerales sulfurados, como los que se encuentran en la Tabla 1 del Anexo, donde se entrega una lista de microorganismos reconocidos con importancia comercial en operaciones biohidrometalúrgicas como también aquellas que únicamente pueden ser exploradas en pruebas de laboratorio pero que parecen ser prometedoras a futuro.

### 2.2.2 Diversidad de microorganismos en un sistema de biolixiviación

En los ambientes naturales asociados a la minería, es posible encontrar una variedad de microorganismos como bacterias y arqueas<sup>15</sup>, pero en su mayoría bacterias, cuya población se encuentra fuertemente influenciada por la temperatura a la que están expuestas así como por los nutrientes presentes. La temperatura en los sistemas industriales no supera los 45°C y en esta situación es posible encontrar bacterias de las especies *Acidithiobacillus ferrooxidans* (A.f), *Acidithiobacillus thiooxidans* (A.t) y *Leptobacillus ferrooxidans* (L.f) que son las más prevalentes. Respecto a los nutrientes en un medio con ión ferroso es común encontrar A.f, y en su ausencia predomina la A.t y la L.f. La presencia de determinadas especies de bacterias dependerá del mineral biolixiviado, por lo que las condiciones óptimas de operación podrían no ser exactamente las mismas para todos los recursos mineros, para ello es importante conocer su composición mineralógica (Vasquez, L. M., 1997).

Cada especie de bacteria tiene distintos requerimientos de nutrientes como fuentes energéticas (Ver Tabla 1, Anexo), por lo que una mezcla de bacterias podría resultar más beneficiosa que una especie pura, en la biolixiviación de un mineral. Así por ejemplo los compuestos que no son oxidados por una especie, pueden ser oxidados por la otra, evitando una acumulación que podría resultar tóxica.

### 2.2.3 Cultivo de microorganismos

---

<sup>15</sup> Bacterias y arqueas, son organismos "procariontes" o carentes de núcleo y unicelulares, pero con diferencias tan fundamentales a nivel molecular, que se clasifican en grupos distintos.

El remanente de la explotación del mineral de mayor ley y los relaves de flotación quedan cerca de los yacimientos, expuestos a las condiciones ambientales, lo que crea un ambiente propicio para el desarrollo de microorganismos. De los drenajes ácidos que se generan naturalmente, se puede aislar microorganismos para su cultivo<sup>16</sup> en laboratorio ya sea una especie en particular o una comunidad.

Sin embargo, existe consenso en que los métodos que utilizan cultivo son inadecuados para estudiar la composición microbiana de una comunidad, pues solo permiten observar una pequeña fracción de los microorganismos que crecen en el sistema natural. El cambio de medio distinto al original, hace que los cultivos sean selectivos y con ello se subestime el número y variedad de microorganismos de una muestra (Vasquez, L. M., 1997).

Para estudiar los microorganismos presentes en el medio natural, últimamente se ha optado por el análisis de ADN extraído directamente del sistema, lo que es independiente de la facultad del microorganismo para crecer en un medio de cultivo (Vasquez, L. M., 1997). Tarea que se ve facilitada por la existencia y disponibilidad del secuenciamiento del código genético de las especies bacterianas lixiviantes.

#### 2.2.4 Factores que afectan el desarrollo bacteriano.

El papel que juegan los factores ambientales, biológicos y fisicoquímicos, sobre el crecimiento y desarrollo de las bacterias es fundamental en el rendimiento de la extracción de metales por biolixiviación. El control de estos factores es muy importante para asegurar las condiciones óptimas de pH, humedad, temperatura, nutrientes, fuentes de energía que deben existir junto con la ausencia de inhibidores, que permitan obtener el máximo rendimiento de cobre.

Los factores que influyen en la respuesta de los microorganismos encargados de la biolixiviación según Pradhan *et al.* (2008) y el ITGE (1991) son:

- pH: Son bacterias acidófilas, es decir crecen en medios ácidos, siendo incapaces de desarrollarse a un pH mayor de 3.0. El pH define que especies de bacterias se desarrollarán en el medio
- Oxígeno y dióxido de carbono: Como la mayoría de las bacterias lixiviantes en la naturaleza son aeróbicas, necesitan un ambiente con oxígeno para sobrevivir. El aire aporta el oxígeno (O<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) necesarios para la lixiviación, por lo que es importante asegurar la aireación independiente de la tecnología utilizada. El oxígeno es utilizado como oxidante por los microorganismos en ambientes de

---

<sup>16</sup> Un cultivo es un conjunto de microorganismos a los que se les ha hecho crecer deliberadamente en un determinado medio y a escala de laboratorio (ITGE, 1991).

lixiviación. El dióxido de carbono es utilizado como fuente de carbono para la fabricación de su arquitectura celular o generación de biomasa.

- Nutrientes: como todos los seres vivos estos microorganismos requieren de fuentes nutricionales para su óptimo desarrollo, que pueden obtener del mismo mineral, como 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 microorganismos utilizan como fuente primaria de energía el ion ferroso y el azufre inorgánico. En la lixiviación de mineral el ión ferroso ( $Fe^{+2}$ ) es producido biológicamente, por ello no es necesario añadirlo.
- Luz: la luz visible y la no filtrada tienen un efecto inhibitorio sobre algunas especies de bacterias, pero el hierro ofrece alguna protección a los rayos visibles.
- Temperatura: Los microorganismos se clasifican según el rango de temperatura en el cual pueden sobrevivir. Así las mesófilas sobreviven en un rango óptimo de 30-40°C, las moderadamente termófilas a una temperatura cercana a los 50°C, y las extremadamente termófilas sobre los 65°C. Si la temperatura del medio en que se encuentren los microorganismos es menor a 5°C, se vuelven inactivos volviendo a cumplir su función si aumenta la temperatura, pero si la temperatura del medio sobrepasa el óptimo, los microorganismos se mueren.

Es importante considerar que la reacción de oxidación de los minerales sulfurados es exotérmica, es decir libera calor al medio lo que produce el aumento de la temperatura. La posibilidad de controlar la temperatura dependerá del diseño de la tecnología de biolixiviación ocupada, por ejemplo sería más difícil el control en una pila que un tanque agitado.

- Presencia de Inhibidores: durante el proceso de biolixiviación, se van acumulando metales pesados como zinc, arsénico y hierro en la solución de lixiviación, y en ciertas concentraciones resultan tóxicos para los microorganismos. Estas concentraciones tóxicas se pueden disminuir al diluir la solución lixivante.
- Potencial redox (Eh): La oxidación de las especies reducidas depende del movimiento o transferencia de electrones, por lo tanto influye en el metabolismo de la bacteria. De esta manera, la medida del potencial es un indicador de la actividad microbiana, mientras mayor sea el potencial medido, mayor será la actividad microbiana. El potencial óptimo es de 600 a 800 mV (miliVolt).
- Tamaño de partícula: a menor tamaño de la partícula de mineral, mayor es el área de contacto que tiene el microorganismo, haciendo más efectiva la lixiviación.

Todos estos factores pueden variar según el tipo de microorganismo (Ver tabla 1, Anexo).

## 2.3 Tecnologías de Biolixiviación<sup>17</sup>

Las diferencias entre las tecnologías de biolixiviación dependen del lugar de aplicación, la metodología ocupada, la ley de cobre y el tamaño de partícula del mineral, principalmente. Una categorización amplia según Brierley (2008), es la separación de las tecnologías según el método en que se basan para hacer la lixiviación. En este como los procesos de lixiviación basados en el riego y los basados en la agitación.

### 2.3.1 Procesos basados en el riego

#### *Biolixiviación en pilas*

Esta tecnología se puede procesar material recién extraído de la mina y mineral chancado, minerales de ley intermedia, sulfuros secundarios y primarios. La extracción de cobre desde minerales secundarios de cobre, como la calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y la covelina ( $\text{CuS}$ ), por biolixiviación en pila es ampliamente practicada en todo el mundo.

Generalmente las pilas se construyen con material previamente chancado, de 19mm o menos, que es llevado por correas transportadoras al área o patio de acopio, lugar donde se forma la pila. En el trayecto el mineral es curado, irrigado con una solución de ácido sulfúrico concentrado o puede ser previamente aglomerado en tambores rotativos con agua acidificada para acondicionar el mineral a los microorganismos y también para fijar las partículas finas a las partículas más grandes de mineral.

Luego el mineral es apilado en las áreas o canchas de acopio que están especialmente diseñadas. Los patios son revestidos con polietileno de alta densidad (HDPE) y se instala sistema de drenaje con tuberías de plástico perforadas, que permiten capturar la solución lixiviada desde la base. También se instala una red de líneas de aire de plástico perforado, mediante la cual el aire es forzado por ventiladores externos a la pila, lo que asegura la disponibilidad de aire a los microorganismos.

Una vez preparada la base, el mineral se apila ordenadamente con apiladores automatizados, formando un terraplén o pila de 6-8 m de altura. Las pilas pueden ser dinámicas si después de la lixiviación, el mineral se remueve para enviarlo al botadero y la base de la pila se reutiliza; o pilas permanentes si las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores. El sistema de pilas permanentes permite no trasladar el material ya lixiviado a un botadero final, ya que el área de lixiviación se convierte en botadero al terminar los ciclos de riego.

Sobre la pila se instala un sistema de riego por goteo o aspersores los que riegan la pila con una solución de ácido sulfúrico, agua y microorganismos. Los microorganismos crecen naturalmente en la pila pero a objeto de mejorar el rendimiento de la operación, es que en una etapa previa de laboratorio se aíslan los microorganismos más adecuados a las

---

<sup>17</sup> Para más detalles, ver Pradhan N. (2008) y Brierley (2008).

condiciones existentes en la pila y se hacen crecer para luego introducirlos en el mineral o inocular<sup>18</sup>, sembrándolos mediante aspersores.

La solución ácida que se infiltra a través de la pila va disolviendo el cobre contenido en los minerales sulfurados, formando una solución de sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>) que es recogida por el sistema de drenaje, y llevada fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas hasta la planta de extracción por solvente. Aquí se recupera el cobre de la solución para luego formar los cátodos en la etapa de electroobtención, y el ácido es refinado y recirculado para el riego de las pilas.

Se estima que para lograr un máximo de recuperación de cobre de 80-90% se requieren de 250-350 días de biolixiviación. Las principales ventajas de la biolixiviación en pila son el bajo capital y costos de operación, la ausencia de emisiones tóxicas y la minimización o la completa eliminación de cualquier descarga de agua porque se reciclan todas las soluciones.

#### *Biolixiviación en botaderos*

Con esta tecnología se procesa lastre<sup>19</sup>, minerales de baja ley de cobre (menor a 0,5 %), mineral recién extraídos de la mina, sulfuros secundarios y primarios. Como el contenido de cobre en estos minerales es tan mínimo como para cubrir los costos de la flotación y fundición, los grandes fragmentos de mineral son arrojados a los botaderos. Estos tienen una base impermeable desde la que se puede capturar los lixiviados.

En la superficie del botadero se aplica la solución de ácido sulfúrico y agua. Los microorganismos crecen naturalmente dado que se dan las condiciones óptimas para su crecimiento.

Debido al gran tamaño de las partículas de mineral, el área de contacto entre microorganismo-mineral disminuye, y sumado a una baja aireación, pues no se instalan líneas de aire, la acción microbiana disminuye afectando la eficiencia del proceso. Es por ello que la biolixiviación de cobre en los botaderos se mide en décadas, debido a la baja tecnología aquí aplicada. Sin embargo, por esto último es un método muy económico.

Los minerales son lixiviados donde fueron colocados para su eliminación, y desde la base la solución de lixiviación es dirigida a los procesos de extracción con solvente y electroobtención para la posterior producción de cátodos de cobre. Al igual que la biolixiviación en pilas, el ácido también es refinado y recirculado a la parte superior del botadero.

#### *Biolixiviación in situ*

La biolixiviación in situ, trata el mineral en la mina, previa fractura de esta por tronadura permitiendo a la solución fluir libremente.

---

<sup>18</sup> Implica transferir microorganismos desde un medio óptimo de cultivo a un medio natural.

<sup>19</sup> Minerales que no son económicamente rentables para ser procesados.

Este método se aplica a minas abandonadas y minas subterráneas, donde los depósitos de mineral no pueden ser extraídos por los métodos convencionales, por ser minerales de baja ley o de pequeños depósitos o ambos, siendo no rentable su extracción.

Por las implicancias ambientales que conlleva la utilización de soluciones ácidas en un área de suelo no impermeabilizado, es que su aplicación es mínima.

### **2.3.2 Procesos basados en la agitación**

#### *Biolixiviación en tanques agitados*

Se utiliza para minerales de ley intermedia a alta y concentrados de mineral, que generalmente es calcopirita, debido al capital y costos de operación asociados con esta tecnología.

Los minerales son depositados en un tanque de acero inoxidable de gran tamaño, equipado con agitadores mecanizados y con la introducción de aire por ventiladores, lo que asegura la disponibilidad de oxígeno y dióxido de carbono para los microorganismos. Es necesario inocular estos reactores con los microorganismos, para lograr la biolixiviación que opera en un proceso continuo.

### **2.4 Ventajas y desventajas de su aplicación**

El uso de estas especies de bacterias a nivel industrial está asociado directamente a su capacidad de crecimiento en medio ácido (carácter acidófilo), a los escasos requerimientos de nutrientes e infraestructura necesarios, debido a que no requieren fuentes orgánicas de energía ni mantenimiento de temperaturas elevadas. Otras ventajas de la tecnología microbiana sobre los métodos convencionales son:

- 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 bio-hidrometalúrgicas, en comparación con los procesos convencionales.
- No se emiten gases ni polvo, lo que produce un impacto ambiental varias veces inferior a la tecnología clásica de pirometalurgia, que genera emisiones con altos contenidos de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y arsénico (As), por el tratamiento de sulfuros en fundiciones.
- Permite ahorrar en tecnología de abatimiento, como sistemas o chimeneas de alto costo, al bajar los índices de azufre y arsénico asociados a hornos de fundición.

- Permite el tratamiento de los recursos y reservas crecientes de minerales con baja ley de cobre que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales.
- Se pueden tratar concentrados que contengan altos niveles de metales con efectos negativos para la fundición de cobre como de zinc.
- La acción de las bacterias permite lixiviar los minerales sulfurados a temperatura y presión ambiente en la presencia de oxígeno, obtenido del aire.
- Durante el proceso se genera parte del ácido y el calor requeridos en la lixiviación. El ácido se genera como producto de las reacciones de oxidación y el calor se libera por la oxidación de la pirita, a veces presente en la matriz de mineral, lo que aumenta cerca de 7°C la temperatura en el medio.
- Los microorganismos crecen y se reproducen sin la necesidad de adicionar una fuente de carbono, pues la obtienen del dióxido de carbono del aire.

Entre las desventajas propias de la tecnología aplicada son los impactos ambientales que esto genera, reflejado en la alta producción de ácido por parte de las bacterias (en particular contaminando fuentes de aguas subterráneas). Este hecho, junto con la búsqueda por hacer más eficientes los procesos de biolixiviación, ha impulsado la búsqueda de soluciones a nivel genético de la bacteria.

- A bajas temperaturas la acción de las bacterias disminuye y con ello la recuperación de cobre. Sería necesario invertir en un sistema que pueda aumentar la temperatura en la matriz de mineral, para garantizar recuperaciones mayores de cobre.
- Los tiempos para una recuperación significativa de cobre, son más largos para metodologías menos controladas, como la biolixiviación en botaderos.
- Es importante controlar variables como la temperatura, aireación, pH, tamaño de partículas, para asegurar las condiciones óptimas de funcionamiento de las bacterias, pero esto resulta difícil en metodologías de mayor envergadura como los botaderos y las pilas.



### **3. Aplicación de la biolixiviación**

#### **3.1 Desarrollo nacional**

La biolixiviación en Chile comenzó a experimentarse en Chuquicamata de la División Norte de Codelco, II Región a comienzos de los 70' en pilas de ripio de mineral de ley marginal, desde donde era posible recuperar cobre mediante unas bacterias. Del estudio en terreno, se lograron aislar y hacer cultivos de estas bacterias, para posteriormente esparcirlas en solución sobre la pila de mineral, potenciando el proceso de biolixiviación que se daba por las bacterias naturalmente presentes (CIMM, 2005).

En 1986 se inició la aplicación comercial de la biolixiviación a minerales sulfurados remanentes de la lixiviación primaria de minerales oxidados y mixtos de cobre, en la mina Lo Aguirre de la Sociedad Minera Pudahuel Ltda. ubicada en la Región Metropolitana. Al comienzo de sus operaciones, los minerales oxidados y mixtos de cobre caracterizaban el yacimiento de la mina, pero paulatinamente comenzó a disminuir el contenido de óxidos del mineral recién extraído, hasta que en 1987 éste era tan bajo que desde ese mismo año, se comenzó a aplicar la biolixiviación ya no como una lixiviación secundaria, sino como la única alternativa de lixiviación para los minerales extraídos por la minera, por tener un alto contenido de sulfuros de cobre. La mina se clausuró en 1996 debido al agotamiento del yacimiento.

Luego en los años 1993 y 1994 nacen 2 proyectos mineros en la I Región: Cerro Colorado y Quebrada Blanca respectivamente, con ellos se impuso el desafío de implementar la biolixiviación en condiciones adversas de altura geográfica y de temperatura ambiente. (Domic E., 2001).

La planta Cerro Colorado, de BHPBilliton, desde un principio fue diseñada para realizar biolixiviación de minerales oxidados y sulfurados, compuestos principalmente de crisocola y calcosina respectivamente. El proceso de producción en Cerro Colorado incluye la extracción de mineral a rajo abierto, chancado, aglomeración, lixiviación en pilas dinámicas, extracción por solventes y electro-obtención, así el mineral sulfurado se disuelve por acción bacterial y el mineral oxidado por la acción de la solución acida. (Minergía, 2006)

La planta Quebrada Blanca, inició sus operaciones para la biolixiviación de sulfuros secundarios de cobre, siendo calcosina mayoritariamente. Su proceso de producción incluye las mismas etapas que se hacen en Cerro Colorado, pero para hacer la aglomeración y el riego de pilas las soluciones se calientan con el objetivo de aumentar la temperatura de las pilas, que se ve favorecida con las cubiertas de plástico. Para seguir cumpliendo con las metas de producción, en el año 2003 incorporaron la lixiviación en botaderos, que aporta con el 25% de la producción por biolixiviación (Hydro Copper, 2007).

La factibilidad técnica y económica del proceso de biolixiviación fue un tema importante de probar en el año 1997, a raíz de esto Codelco y BHPBilliton se unieron en una alianza estratégica –join venture- y formaron una sociedad constituida en partes iguales llamada Alliance Copper Limited, ACL. Codelco aportó con su experiencia en extracción con solvente y electroobtención, mientras que BHPBilliton contribuyó con su conocimiento en la tecnología de biolixiviación con marca BioCop, de concentrados de cobre en tanques agitados. Esta alianza permitió tener en operación una planta piloto en la división Chuquicamata durante 4 años, tiempo en el cual los estudios realizados permitieron validar la tecnología (Codelco, 2002). El principal logro fue encontrar una solución a la explotación de yacimientos con un alto contenido de arsénico, pues esta tecnología deja el arsénico en una especie estable como para ser dispuesto como relave (Minería Chilena, 2005). Con la tecnología probada, el paso siguiente fue la creación de una planta prototipo de biolixiviación con una capacidad de producción de 20.000 toneladas de cátodos por año, la que obtuvo la resolución de calificación ambiental favorable por parte de la Corema- II Región, el 2005. El próximo objetivo era la creación de una planta a escala industrial, con capacidad de 100 a 150 mil toneladas de cátodos de cobre por año, para el procesamiento de concentrados de la mina ministro Alejandro Hales (ex Mansa Mina).

El año 2006 se disolvió la alianza ACL y Codelco compró las acciones a BHP Billiton, por lo que la empresa pasó a llamarse EcoMetales Limited. Como la tecnología BioCOP está patentada por BHP, en la venta se retiró la licencia BioCOP, los equipos y tecnologías asociados a este proceso, quedándose Codelco con los demás activos de la planta, los que podía emplear para desarrollar otros procesos distintos a BioCOP, tecnología que según el acuerdo de fin de la alianza, no podría ser utilizada por Codelco hasta el año 2016. Actualmente EcoMetales procesa polvos de fundición de las fundiciones Chuquicamata y Ventanas (EcoMetales, 2009).

En un esfuerzo del Gobierno de Chile por implementar la biotecnología en los sectores económicos claves como la minería, nace el programa Genoma Chile el año 2001 para financiar parte de los proyectos de investigación presentados en este contexto. En este marco se crea BioSigma S.A, una alianza estratégica –join venture- entre Codelco (66,7%) y Nippon Mining & Metals Co., Ltd (33,3 %), que comenzó sus actividades el 2002. En el programa de biominería de Genoma Chile que contribuyó con US\$ 2 millones<sup>20</sup>, esta alianza realizó un proyecto de investigación de biolixiviación que abarcaba desde su optimización hasta estudios genéticos de los microorganismos involucrados. Uno de los resultados obtenidos de la investigación hasta el 2006, fue el aislamiento, secuenciamiento e identificación del genoma de 3 bacterias altamente eficientes en la oxidación de hierro y azufre de los minerales de cobre, lo que optimiza los tiempos para la recuperación de cobre. Estas bacterias fueron bautizadas con nombres del mapudungún

---

<sup>20</sup> La inversión inicial fue de US\$ 2 millones el Estado de Chile, US\$ 2 millones CODELCO y US\$ 1 millón Nippon Mining Ltda. Hoy BioSigma está evaluada en US\$ 40 millones.

Wenelen (pionera) recientemente patentada, Licanantay (la atacameña) y Yagan (la fueguina), estas últimas en espera de sus patentes. (Portal Minero, 2009)<sup>21</sup>.

BioSigma S.A., no sólo ha desarrollado avances importantes a nivel de la investigación de laboratorio. En conjunto con CODELCO, ha venido desarrollando en los últimos dos años una aplicación piloto en la División Andina para el tratamiento de una pila de 50.000 ton. de mineral de baja ley (95% de calcopirita), alcanzando con la tecnología aplicada por BioSigma tasas de recuperación de hasta un 35% de cobre.

Los exitosos resultados en la planta piloto, han validado la tecnología aplicada, y que en la actualidad se apresta a un desarrollo a escala industrial. En esa línea, se espera para el 2010 la puesta en marcha de una aplicación a gran escala, sobre una pila de más de 20 millones de toneladas de minerales mixtos (óxidos y sulfuros secundarios y primarios, en particular calcopirita), lo que significará un aumento en la producción anual del orden del 10% al 20%.

Por otra parte, la minera Escondida, con BHPBilliton como dueño mayoritario, ha implementado el proceso de biolixiviación en sus instalaciones. Esta minera produjo el primer cátodo de cobre mediante biolixiviación en pilas el año 2006, y tiene una producción estimada de 180.000 toneladas de cátodos anuales. Durante los años de operación, Escondida y Escondida Norte han acumulado 1.500 millones de toneladas de mineral sulfurado de baja ley, con lo que se estima una vida útil de 20 años para el nuevo proyecto de biolixiviación, que necesitó una inversión de US\$ 870 millones que considera además la construcción de una nueva planta de electroobtención, una planta desalinizadora de agua de mar y el tendido de cañerías para transportar el agua obtenida a la planta de biolixiviación (Minera Escondida, 2006). Un aporte importante en materia de investigación asociada a los procesos de la minera Escondida, ha estado a cargo del Centro de Biotecnología de la Universidad Católica del Norte, quienes en asociación con Escondida, y con varios proyectos públicos concursados, desarrollan investigación en las pilas de materiales de baja ley.

Otras compañías mineras también han desarrollado con éxito la biolixiviación en sus plantas, y/o desarrollan investigación en la materia. (Ver Tabla 2, Anexo).

---

<sup>21</sup> Los microorganismos con que trabaja la minería provienen de la naturaleza y para acceder a ellos existen dos formas. La primera es usar los ceparios internacionales que poseen los archivos de microorganismos de países como Japón y Estados Unidos. La segunda opción es realizar una búsqueda por cuenta propia. Parte de la labor de Biosigma ha sido buscar microorganismos en fuentes termales, azufreras y yacimientos. Cuando hay resultados, las bacterias se prospectan e identifican, para luego seleccionárlas y separárlas. En el caso de Wenelen, Licanantay y Yagán se buscaron microorganismos en yacimientos o lugares donde hay escurrimientos de aguas ácidas provenientes de minas abandonadas.

## 3.2 Investigación y desarrollo

### *Patentes y Marcas*

Una patente es un derecho de propiedad industrial, que permite al titular utilizar y explotar su invención e impedir que terceros la utilicen, fabriquen, distribuyan o vendan, sin su consentimiento. Este derecho exclusivo para proteger una invención lo concede el Estado, a través del Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INAPI). Las patentes se otorgan a nivel nacional por un período de 10 ó 20 años, dependiendo de la patente solicitada, periodo que comienza desde la fecha de presentación de la solicitud. (INAPI) Una vez concedida la patente en el país donde se realizó la invención, esta se puede patentar en otros países, como el caso de la bacteria *wenelen* que luego de ser patentada en Chile se patentó en Estados Unidos.

El resumen de la patente obtenida por Biosigma dice: “la presente invención se relaciona con una bacteria aislada, quimiolitotrófica de la especie *acidithiobacillus ferrooxidans* denominada *wenelen*, su uso en la lixiviación de minerales o concentrados de especies metálicas sulfuradas y procesos de lixiviación basados en el uso de la bacteria, o mezclas que la contengan. Esta cepa *wenelen* tiene una actividad oxidante aumentada, especialmente en el caso de la calcopirita, en comparación con otras bacterias conocidas. Debido a lo anterior, esta bacteria presenta un gran interés para aplicaciones de la biominería”. (INAPI)

Al igual que una patente, una marca también es un derecho de propiedad industrial. Por marca se entiende a “todo signo -palabra, etiqueta con diseño o su combinación- utilizado para distinguir en el mercado, productos, servicios, establecimientos industriales y comerciales” (INAPI). Tener registrada una marca le da al titular el derecho exclusivo de utilizarla para identificar bienes o servicios, durante un periodo de 10 años renovables indefinidamente por periodos iguales. Para permitir su uso por parte de terceros, el titular de la marca puede hacer contratos de licencia, por los que obtiene ganancias.

Una marca asociada al área de la biominería es BioCOP®, un proceso desarrollado por BHP Billiton en Sudáfrica y aplicado en Chile. Su objetivo es procesar concentrados de minerales sulfurados de cobre con un contenido importante de arsénico, impureza que impide la vía de la pirometalurgia, y se utilizan bacterias termófilas que disminuyen los tiempos de recuperación de cobre.

### *Investigación*

El éxito de la aplicación de una nueva tecnología depende claramente de su eficiencia, la que puede ser aumentada mediante el manejo de diferentes factores. Este objetivo ha sido perseguido en las investigaciones destinadas a mejorar el proceso de biolixiviación. Una de ellas ha sido la dirigida por el Dr. David Holmes en el Centro de Bioinformática y Biología Genómica de la Universidad de Santiago. Su investigación se basa en el estudio de fragmentos del genoma de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, tarea facilitada por el conocimiento de la secuencia completa de su genoma, realizada en Estados Unidos. Con la ayuda de programas computacionales se hace la identificación de

algunos genes, para luego determinar su función en el comportamiento de la bacteria. Conociendo la función de un determinado gen sería posible cambiar y aumentar la capacidad de biolixiviación de la bacteria, lo que favorecería la producción de cobre y con ello la economía del país (Bioplanet, 2004).

BioSigma S.A por su parte, ha desarrollado una tecnología que le permite, en lapsos breves de tiempo, procesos de identificación y diagnóstico de los micro-organismos (BioID), control de las funcionalidades de los mismos (Planta de Biomasa), y control de las condiciones de operación de éstos en el medioambiente. Estos dos últimos procesos, son considerados fundamentales y diferenciadores en los procesos de la biolixiviación, puesto que no solo se identifica el micro-organismo que se busca, sino que se logra controlar sus funcionalidades y se logra reproducir lo que realmente se requiere para un proceso determinado.

### **3.3 Producción Actual**

Parte importante de la economía nacional depende de la producción de cobre. Si bien, la participación en el PIB nacional de la minería del cobre bordea el 6% aproximadamente en precios constantes de 2003, en términos del aporte al fisco, CODELCO y ENAMI, representan aproximadamente el 15% del total de ingresos fiscales (COCHILCO, 2009). Por ello es importante mantener las metas de producción, lo que se hace cada vez más difícil debido al agotamiento de los recursos de mayor ley de cobre y minerales oxidados dejando para la explotación, los recursos de menor ley de cobre y los minerales sulfurados. Ante este panorama, es muy importante el aporte que hacen las nuevas tecnologías como la biolixiviación, en incrementar la producción total de cobre.

Se estima actualmente, que a través de la tecnología de la biolixiviación se recuperan anualmente 555 miles toneladas de cobre fino, lo que sobre un total de producción anual de cobre fino de 5.330,3 miles de toneladas, representa el 10,4% de la producción total de Cobre (ver cuadro siguiente).

**Cuadro 1. Producción de cobre en Chile bajo tecnología de Biolixiviación**

Operación	Producción (TM/año 2008)	Operador	Grado Cobre	Duración proceso
Quebrada Blanca	82.000	Teck	0.3	1994-Present
Codelco-Chuquicamata	85.000	CODELCO	0.3	1994-Present
Andacollo	22.500	Teck	0.58	1996-Present
Dos Amigos	10.000	Cemin	2.5	1996-Present
Los Bronces	46.400	Anglo American	0.45	2006-Present
Minera Escondida	182.000	BHP Billiton	0.3 - 0.7	2006-Present
Minera Spence	128.000	BHP Billiton	1.12	2007-Present
Tota Producción por Biolixiviación	555.900			
% Biolixiviación / Producción Total	10,4			

Fuente: Demergasso, C. (2009).

#### **4. Resumen y conclusiones**

La biolixiviación tiene, ante todo, un objetivo de creación de riqueza. Permite aumentar las tasas de recuperación del mineral, por tanto, hacer más rentable un determinado proceso.

No obstante, la implementación de una nueva tecnología conlleva un alto grado de incertidumbre, asociado a la falta de información y práctica en las operaciones. Es claro que mientras más difundida sea la tecnología y su aplicación, las barreras de acceso a éstas debiesen disminuir así como el riesgo percibido por la empresa de su aplicación.

Además de las limitaciones establecidas por el propio inversionista, existen las limitaciones asociadas al mercado como el aumento del costo energético para el funcionamiento de los equipos, la disminución gradual de la ley de mineral, y la creciente demanda ambiental, que establece regulaciones más exigentes para los nuevos proyectos y mayor fiscalización para los que ya están en operación (Lawrence. R. W., 1995). El mercado y la demanda ambiental establecen limitaciones a las tecnologías convencionales, y por lo tanto exigen nuevas tecnologías más eficientes, económicas y ambientalmente limpias.

El desafío entonces es aumentar la aplicación comercial, en base a que existen investigaciones científicas tanto internacionales como nacionales, hace décadas, que avalan la tecnología de biolixiviación, además de estudios en plantas pilotos a escala industrial para probar la factibilidad técnica y económica del proceso, dando excelentes resultados.

Para que la aplicación comercial e industrial de una nueva tecnología sea exitosa, debe basarse en un desarrollo sustentable que involucra lo económico, ambiental y social. De esta manera los desafíos en materia de aplicación de las tecnologías de biolixiviación apuntan a: mejorar la eficiencia de su aplicación, por ejemplo mediante el manejo genético de los microorganismos involucrados para aumentar las tasas de recuperación de cobre; realizar una explotación racional de los recursos, para asegurar su disponibilidad futura; reutilizar materiales de baja ley que se habían dispuesto como lastre para disminuir la explotación de mineral fresco; lograr una eficiencia en los insumos mediante su recirculación, o la utilización de agua de mar; minimizar los impactos ambientales preocupándose por ejemplo que el material que es dispuesto en botaderos, o como relaves quede con especies químicamente estables, como el caso del arsénico.

El rol del Estado se ha limitado a implementar programas para incentivar la biotecnología en la minería, como el programa Genoma, mediante un financiamiento parcial de los proyectos. El desafío es mejorar la participación del Estado, en particular, en el fomento al desarrollo y la investigación en esta materia. La tecnología de la Biolixiviación es clave para el aumento de la eficiencia de las operaciones, y por tanto en incremento de las riquezas del país.

En este sentido, y dada la importancia de la minería del cobre en el país, se tienen altas ventajas comparativas en el desarrollo de la investigación asociada a estas tecnologías, y el Estado debiese cumplir un rol clave, ya sea en el fomento de éstas investigaciones, y también en la generación de los incentivos que permitan atraer capitales para el desarrollo local de la investigación en esta materia.



## Referencias Bibliográficas

Brierley, C.L. (2008). "How will biomining be applied in future?". Transactions of nonferrous metals society of China 18: 1302-1310, 2008.

Brierley, J.A. and Brierley, C.L. (2001). "Present and future commercial applications of biohydrometallurgy". Hydrometallurgy 59: 233-239, 2001.

CIMM (2005). "Biolixiviación: La Nueva Minería". Web Centro de Investigación Minera y Metalúrgica. [http://www.infoindustriaperu.com/articulos\\_pdf/mineria/metalurgia/008.pdf](http://www.infoindustriaperu.com/articulos_pdf/mineria/metalurgia/008.pdf)

Colmer, A.R., Hincle, M.E. (1947). "The role of microorganisms in acid mine drainage: a preliminary report". Science 106: 253-256, 1947.

CNDB (2003). "Informe al Presidente de la República". Web Comisión Nacional para el Desarrollo de la Biotecnología. Junio de 2003. Pág 7. <http://infoagro.net/shared/docs/a2/BioteChile.pdf>.

CNDB (2003b). "Chile: la biotecnología como herramienta para el desarrollo y el bienestar. Política nacional para el desarrollo de la biotecnología". Web Comisión Nacional para el Desarrollo de la Biotecnología. Noviembre 2003. Página 12. [http://www.dinama.gub.uy/biosecuridad/images/Contenido/PDFdePaises/Chile/chile%20politica\\_biotecnologia.pdf](http://www.dinama.gub.uy/biosecuridad/images/Contenido/PDFdePaises/Chile/chile%20politica_biotecnologia.pdf).

CODELCO (2002). Alianza Codelco-BHP Billiton: Lidera biolixiviación de cobre. Informe Sustentable 20, Junio de 2002. Web Corporación Nacional del Cobre. <http://www.codelco.cl/desarrollo/20/agenda20.asp>

Domic, E. (2001). Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones. 1ª ed. 2001. Santiago.

EcoMetales Limited (2009). Información obtenida en línea. [http://ecometales.qdos-grafica.cl/nuestra\\_empresa/historia/](http://ecometales.qdos-grafica.cl/nuestra_empresa/historia/)

Gana, Juanita (1988). "La minería del cobre en Chile". Ambiente y Desarrollo., Vol. IV - Nros - 1 y 2: 19-25. [en línea] Abril-Agosto 1988. [http://www.cipma.cl/RAD/1988/1-2\\_JuanitaGana.pdf](http://www.cipma.cl/RAD/1988/1-2_JuanitaGana.pdf)

Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INAPI) [en línea]. <[www.inapi.cl](http://www.inapi.cl)>

Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE). Minería química. 1994

Jara, J. (2008). Curso de inducción a la minería: Desde el descubrimiento del yacimiento a la operación minera. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).

Lawrence, R.W y Poilin, R. (1995). "The demand for biotechnology in mining in the 21<sup>st</sup> century". En: International Biohydrometallurgy Symposium (1º, Viña del Mar, Chile, 1995). 185-195p.

MINERA ESCONDIDA. Proyecto Biolixiviación de Sulfuros produjo primer cátodo. [en línea]. Noticias del 29 Junio de 2006. [http://www.escondida.cl/mel/noticias/2006/29\\_Junio2006.asp](http://www.escondida.cl/mel/noticias/2006/29_Junio2006.asp)

MINERGÍA, El proceso productivo. [en línea]. Abril de 2006, N°64 pág 12. <http://www.minergia.cl/pdf/64.pdf>

MINERÍA CHILENA. Alianza Codelco-BHP Billiton se materializa en Planta Industrial de Biolixiviación [en línea]. 02 de septiembre de 2005. [http://www.mch.cl/noticias/imprimir\\_noticia.php?id=627](http://www.mch.cl/noticias/imprimir_noticia.php?id=627)

PORTAL MINERO. Biosigma patentó la bacteria Wenelén [en línea]. 12 de Junio de 2009 [http://www.portalminero.com/editor\\_prensa/notas/1244815200.htm](http://www.portalminero.com/editor_prensa/notas/1244815200.htm)

Pradhan, N., Nathsarma, K.C., Srinivasarao, K., Sukla, L.B., Mishra, B.K. (2008). "Heap Bioleaching of chalcopyrite: a review". *Minerals Engineerring* 21: 355-365, 2008.

QUEBRADA BLANCA, 12 años de biolixiviación en altura [en línea]. En: International copper hydrometallurgy workshop (4º, Viña del Mar, Chile, 2007). [http://downloads.gecamin.cl/cierre\\_eventos/hydrocopper2007/prsntcns/00062\\_00334\\_pr.pdf](http://downloads.gecamin.cl/cierre_eventos/hydrocopper2007/prsntcns/00062_00334_pr.pdf)

Vasquez Pérez, Luz (1997). "Diversidad de los microorganismos quimiolitotróficos presentes en sistemas de biolixiviación". Tesis (Doctor en Ciencias con mención en Biología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, 1997. 1-21.

Vives, Hernán (2009). "Conceptos básicos: Hidrometalurgia de minerales de cobre y "Concentración de sulfuros de cobre". Agosto de 2009.

Dresher, W.H. (2004). "Producing copper nature's way: Bioleaching". Web Copper Development Association. [http://www.copper.org/innovations/2004/05/producing\\_copper\\_natures\\_way\\_bioleaching.html#xmpls](http://www.copper.org/innovations/2004/05/producing_copper_natures_way_bioleaching.html#xmpls).

## ANEXOS

**Tabla 1.** Condiciones óptimas de bacterias asociadas a la lixiviación de minerales.

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

Fuente: Web CODELCO.

**Tabla 2.** Lixiviación en pilas de minerales de cobre (Histórica y actual).

Region/mine	Operation reserves (t)	Ore processed (t/day)	Cu production (t/year)
Lo Aguirre, Chile 1980–1996	Heap bioleach $12 \times 10^6$ at 1.5% Cu	Oxides/chalcocite $16 \times 10^3$	$14-15 \times 10^3$
Cerro Colorado, Chile 1993–	Heap bioleach $80 \times 10^6$ at 1.4% Cu	Chalcocite, covellite $16 \times 10^3$	$100 \times 10^3$
Ivan Zar, Chile 1994–	Heap bioleach $5 \times 10^6$ at 2.5% Cu	Oxides/sulphides $1.5 \times 10^3$	$12 \times 10^3$
Quebrada Blanca, Chile 1994–	Heap/dump bioleach $85 \times 10^6$ at 1.4% Cu Cu $45 \times 10^6$ at 0.5% Cu	Chalcocite $17.3 \times 10^3$	$75 \times 10^3$
Punta del Cobre, Chile 1994–	Heap (bio)leach $10 \times 10^6$ at 1.7% Cu	Oxides/sulphides –	$7-8 \times 10^3$
Andacollo, Chile 1996–	Heap/dump bioleach $32 \times 10^6$ at 0.58% Cu	Chalcocite $15 \times 10^3$	$21 \times 10^3$
Dos Amigos, Chile 1996–	Heap bioleach 2.5%	Chalcocite $3 \times 10^3$	–
Zaldívar, Chile 1998–	Heap/dump bioleach $120 \times 10^6$ at 1.4% Cu Cu $115 \times 10^6$ at 0.4% Cu	Chalcocite $20 \times 10^3$	$150 \times 10^3$
Lomas Bayas, Chile 1998–	Heap/dump $41 \times 10^6$ at 0.4% Cu	Oxides/sulphides $36 \times 10^3$	$60 \times 10^3$
Cerro Verde, Peru 1977–	Heap bioleach — at 0.7% Cu	Oxide/sulphide $32 \times 10^3$	$54.2 \times 10^3$
Escondida, Chile	Heap bioleach $1.5 \times 10^9$ at 0.3–0.7%	Oxides, sulphides	$200 \times 10^3$
Lince II, Chile, 1991–	Heap leach 1.8% Cu	Oxides, sulphides	$27 \times 10^3$
Toquepala, Peru	Heap leach	Oxides, sulphides	$40 \times 10^3$
Morenci, Arizona 2001–	Mine for leach $3450 \times 10^6$ 0.28% Cu	Chalcocite, pyrite $75 \times 10^3$	$380 \times 10^3$
Equatorial Tonopah, Nevada, 2000–2001	Heap bioleach 0.31% Cu	$25 \times 10^3$	$25 \times 10^3$
Gunpowder Mammoth Mine, Australia, 1991–	In situ (bio)leach $1.2 \times 10^6$ at ~1.8% Cu	chalcocite and bornite –	$33 \times 10^3$
Girilambone, Australia 1993–2003	Heap bioleach — at 2.4% Cu	Chalcocite/chalcopyrite $2 \times 10^3$	$14 \times 10^3$
Nifty Copper, Australia, 1998–	Heap bioleach — at 1.2%	Oxides/chalcocite $5 \times 10^3$	$16 \times 10^3$
Whim Creek and Mons Cupri, Australia 2006–	Heap bioleach $900 \times 10^3$ at 1.1% Cu Cu $6 \times 10^6$ at 0.8% Cu	Oxides/sulphides	$17 \times 10^3$
Mt Leyshon, Australia 1992–1997	Heap bioleach — 0.15%	Chalcocite $1.3 \times 10^3$	750
S&K Copper, Monywa, Myanmar, 1999–	Heap bioleach $126 \times 10^6$ at 0.5% Cu	Chalcocite $18 \times 10^3$	$40 \times 10^3$
Phoenix deposit, Cyprus, 1996–	Heap (bio)leach $9.1 \times 10^6$ at 0.78% Cu Cu $5.9 \times 10^6$ at 0.31% Cu	Oxide/sulphide –	$8 \times 10^3$
Jinchuan Copper, China 2006–	$240 \times 10^6$ at 0.63% Cu	Chalcocite, covellite, enargite	$10 \times 10^3$

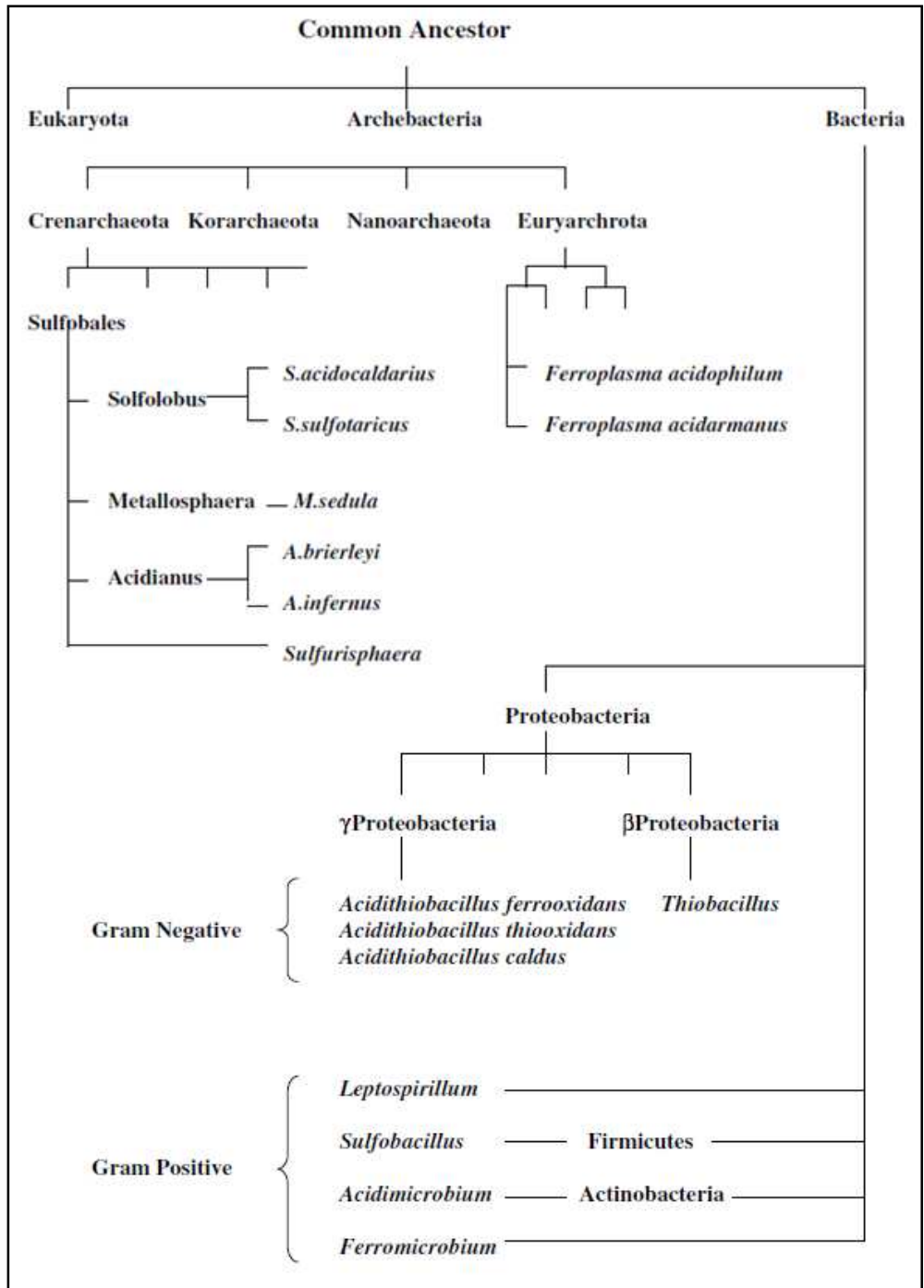
Fuente: WATLING, H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides - A review. *Hydrometallurgy*, Volume 84, Issues 1-2, October 2006, Pages 81-108

**Tabla 3.** Principales especies minerales de cobre de importancia económica, agrupadas según su ubicación aproximada en el yacimiento, con su composición química más frecuente.

Zona Mineralizada	Especie Mineralógica	Composición Más Frecuente Para Esta Especie	Cobre (%)
Zona oxidada secundaria	Cobre nativo	$\text{Cu}^{\circ}$	100
	Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	57,5
	Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	55,3
	Chalcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25,5
	Brochantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	56,2
	Antlerita	$\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$ ó $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	53,7
	Atacamita	$3\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ó $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	59,5
	Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ó $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	36,2
	Dioptasa	$\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$	40,3
	Neotocita	$(\text{Cu}_i - \text{Fe}_j - \text{Mn}_k)\text{SiO}_3$	variable
	Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88,8
	Tenorita	$\text{CuO}$	79,9
	Pitch / Limonita	$(\text{Fe}_i - \text{Cu}_j)\text{O}_2$	variable
	Delafosita	$\text{FeCuO}_2$	42,0
	Copper Wad	$\text{CuMnO}_2\text{Fe}$	variable
Copper Pitch	$\text{CuMn}_8\text{FeSiO}_2$	variable	
Zona de enriquecimiento secundario (o supérgeno)	Calcosina	$\text{Cu}_2\text{S}$	79,9
	Digenita	$\text{Cu}_9\text{S}_5$	78,1
	Djurleita	$\text{Cu}_{1,95-x}\text{S}$	variable
	Covelina	$\text{CuS}$	66,5
	Cobre nativo	$\text{Cu}^{\circ}$	100
Zona primaria (o hipógena)	Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	34,6
	Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63,3
	Enargita	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	48,4
	Tenantita	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	51,6
	Tetrahedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	45,8

Fuente: DOMIC, Esteban M. Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones. 1a ed. 2001. 141p.

**Figura 1.** Microorganismos identificados involucrados en la biolixiviación



Fuente: Pradhan. N, 2008.

*Documento elaborado en la  
Dirección de Estudios y Políticas Públicas de COCHILCO por:*

**Camilo Lagos Miranda**

**Economista**

**Ximena Guzmán**

**Alumna en práctica**

**Química Ambiental, Universidad de Chile.**

**DICIEMBRE 2009**