

Biominería: Los Microorganismos en la Extracción y Remediación de Metales

Cecilia Bernardelli, Josefina Plaza Cazón, María Sofía Urbietta, Edgardo Rubén Donati

RESUMEN

La biominería comprende una serie de procesos microbiológicos que pueden ser utilizados para la recuperación de metales a partir de los minerales. Esta alternativa, de menor impacto ambiental y que requiere menor infraestructura y recursos que las tecnologías tradicionales, puede ser incluso usada con éxito para minerales de muy baja ley. En los procesos extractivos de biolixiviación y biooxidación, los microorganismos solubilizan los metales esencialmente a través de ataques oxidantes y/o ácidos. Por otro lado, el impacto ambiental minero, focalizado en la generación de drenajes ácidos con altos contenidos de metales pesados, puede ser mitigado a través de procesos microbiológicos que inmovilizan los metales presentes; entre ellos, se destacan la biosorción – concentración de metales en la superficie y/o en el interior de las células– y la bioprecipitación –donde microorganismos específicos reducen sulfatos a sulfuros precipitando los metales– que pueden aplicarse en forma conjunta a otros procesos biológicos y fisicoquímicos en los llamados humedales. En este artículo se describen con detalle estos procesos, sus ventajas respecto de los tradicionales y se discuten algunas alternativas para ampliar la aplicación de esta tecnología.

LOS METALES

Desde hace miles de años, los metales constituyen materiales indispensables para el desarrollo de las sociedades humanas. La alta resistencia a esfuerzos e impactos, la elevada conductividad térmica y eléctrica

e incluso su alta reflectividad, son algunas de las características que se aprovechan en centenas de aplicaciones –muchas inadvertidas– dentro de nuestra sociedad moderna y que incluyen desde los materiales de construcción, medios de locomoción, computadoras, teléfonos móviles hasta diversos usos en medicina. En la actualidad se producen más de 2.000.000.000 toneladas de metales al año, implicando un consumo de aproximadamente

300 kg por habitante y por año (lo que es prácticamente el triple de lo que se utilizaba en 1950). Se estima que a pesar de la aparición de materiales alternativos en algunas áreas, los consumos de los metales seguirán incrementándose; por ejemplo, el consumo de hierro se estima que se incrementará desde 750 millones en la actualidad, a 2000 millones de toneladas anuales en 25 años mientras que el consumo de

CINDEFI (CCT La Plata-CONICET, UNLP), Calle 50 y 115, (1900) La Plata, Argentina.

aluminio –actualmente de 20 millones de toneladas anuales– se triplicaría y el del cobre se haría algo más del doble que el actual, en igual período [1]. El incremento del consumo de metales *per cápita* para mantener o mejorar los estándares actuales de nuestra sociedad, impide que el aporte del reciclado de los mismos –en principio, posible para todos los metales aunque con distinto impacto en el consumo de energía– sea relevante respecto del total consumido; actualmente, en promedio, el reciclado no aporta más que el 10-15 % al mercado de consumo de metales [2].

Las consideraciones del párrafo anterior muestran que es indispensable la extracción de los metales de los recursos naturales, excepto que la sociedad modifique sus necesidades y hábitos, lo que no parece factible en el corto plazo. Aún así, el uso de los recursos naturales sólo postergará la decisión que la humanidad deberá tomar en algún momento sobre el tema, ya que el consumo acumulado está próximo a alcanzar las reservas disponibles para varios metales en las próximas décadas. Mientras tanto, resulta prácticamente imposible renunciar a la explotación minera si se pretende mantener las condiciones y las características de nuestra vida cotidiana. En ese sentido, nuestro país podría ocupar un lugar privilegiado considerando que

Argentina está situada entre los tres primeros países del mundo por sus reservas exploradas y aún no exploradas (y estimadas a partir de simulaciones confiables [3]) en cobre, oro y molibdeno, entre otros metales.

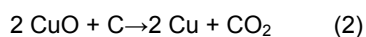
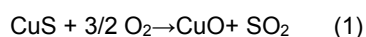
LA MINERÍA METALÍFERA

Los metales están presentes en la naturaleza bajo diferentes formas químicas y minerales (libres o combinados). Naturalmente sólo se encuentran depósitos de metales nativos para aquellos elementos más nobles que no se oxidan ni se combinan con otros elementos con facilidad; entre ellos, se destacan el oro y el platino y, en menor medida, la plata y el cobre. En los casos de los metales que han sido extensamente utilizados por la humanidad, las formas nativas y/o las más sencillas a partir de las cuales puede obtenerse el metal, se han agotado o están muy próximas a hacerlo, quedando fundamentalmente depósitos minerales de muy baja ley (bajo contenido en el metal) y especies refractarias a partir de las cuales se obtienen los metales sólo con tratamientos enérgicos. El cobre, al cual haremos referencia muchas veces en este texto, se explota intensivamente desde hace más de 10.000 años; la mayor parte de las reservas de este metal consisten en minerales sulfurados que están mayoritariamente en baja ley (menor a 1 % en masa de cobre en la roca)

por lo cual la extracción implica separar la porción de interés (minoritaria) de la ganga (porción que no contiene la especie de interés o que la contiene en una proporción muy baja y/o inaccesible). En adelante, para simplificar la discusión, describiremos con detalle el caso del cobre que puede extenderse en mayor o menor medida a los otros metales.

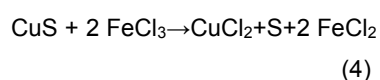
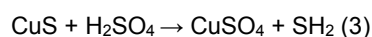
La minería metalífera comienza por la separación de la mena metalífera en operaciones subterráneas o a cielo abierto (Fig. 1); posteriormente las rocas son trituradas para reducir su tamaño (hasta 0,1-1 cm) y eventualmente molidas para reducirlas a escala micrométrica. A partir de allí se pueden aplicar distintos procedimientos extractivos. La mayoría de estos procedimientos supone una previa concentración de cobre hasta incrementar significativamente la ley (por encima del 20-30 % en masa). Existen varias alternativas dependiendo de las especies a separar y de la ley del mineral, pero probablemente la más utilizada es la flotación que aprovecha diferentes propiedades superficiales (las diferencias suelen incrementarse con el agregado de un tensioactivo, denominado *colector*) de la ganga y del mineral de cobre a concentrar, para separarlos en agua. Usualmente los sulfuros y otras especies suelen “flotar” mientras que la ganga es “deprimida”.

Una vez obtenido el concentrado, debe extraerse el cobre. Este procedimiento tradicionalmente se realiza por "vía seca" o por "vía húmeda". En el primero, denominado proceso piro-metalúrgico, los sulfuros son "tostados" en altos hornos (a temperaturas superiores a los 800-900 °C) convirtiéndolos en óxidos (la ecuación (1) muestra, en forma simplificada, el proceso para un sulfuro como la covelita). Luego el óxido es reducido utilizando un agente reductor como C (también suelen usarse H₂ o CO) a cobre metálico (ecuación (2)). Esta metodología, si bien muy rápida, sólo es rentable cuando se aplica a concentrados de alta ley ya que invierte alta cantidad de energía; además, produce grandes cantidades de SO₂ y, usualmente, CO₂ que pueden contribuir (excepto que se tomen medidas para retener dichos gases) a dos conocidos efectos de contaminación ambiental atmosférica: la lluvia ácida y el efecto invernadero, respectivamente.



La vía húmeda implica la disolución selectiva del metal de interés por la acción de un disolvente líquido (lixiviación); cuando el disolvente es agua, el proceso es denominado hidrometalúrgico. Se realiza a

temperaturas moderadas y utiliza soluciones de ácidos y/o de agentes oxidantes en concentraciones relativamente elevadas (las ecuaciones (3) y (4) muestran dos posibles procesos hidrometalúrgicos para lixiviar cobre; posteriormente el cobre debe ser recuperado desde la solución por reducción química o electrolítica.



La hidrometalurgia tiene menos efectos contaminantes que la pirometalurgia, no exige transporte del material ya que puede aplicarse en zonas cercanas a la mina, pero es muy poco rentable para los sulfuros metálicos.

LA BIOMINERÍA

Los problemas ambientales y/o de rentabilidad económica que tienen las dos metodologías descriptas para la recuperación de cobre a partir de minerales sulfurados de baja ley, alientan el uso de alternativas para la extracción de cobre.

Hace más de 50 años se comprobó la relación directa que tienen ciertos microorganismos con la alta concentración de ion férrico observada tanto en drenajes ácidos de minas de carbón y minas sulfuradas como en explotaciones mineras donde se utiliza la hidrometalurgia. Esto mostró el papel innegable que los

microorganismos podrían tener en la extracción de metales presentes en minerales sulfurados y constituye el origen de una tecnología –actualmente denominada "biominería"– que utiliza microorganismos para beneficiar la actividad minera.

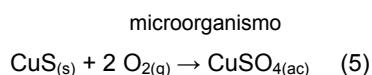
Los procesos biomineros pueden ser utilizados en tres áreas distintas de la actividad minera:

a) Operación de concentración de minerales: bioflotación

La bioflotación es una variante de la flotación donde los microorganismos son utilizados como colectores o modificadores y permiten separar los minerales de interés de la ganga. Los microorganismos se adhieren selectivamente a los minerales, modificando sus propiedades superficiales a través del cambio de su carga neta, su carácter hidrofílico o hidrofóbico o incluso de sus propiedades ácido-base. De ese modo, los microorganismos pueden reemplazar a los tensioactivos que usualmente tienen un fuerte impacto ambiental. Aunque muchos estudios a nivel de laboratorio muestran resultados exitosos, la bioflotación es todavía experimental y no se aplica a escala comercial.

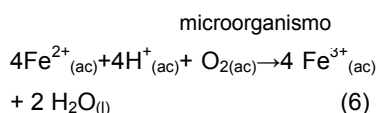
b) Operaciones en la metalurgia extractiva: biolixiviación y biooxidación

La biolixiviación consiste en la disolución del metal acelerada por la acción de ciertos microorganismos. El proceso global es mostrado en la ecuación (5)

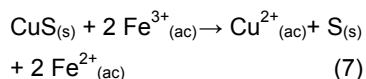


donde la especie original (CuS) es insoluble o muy poco soluble, mientras que el producto (CuSO₄) es soluble en agua, lo que permite separarlo de la matriz mineral.

Este proceso es catalizado por microorganismos hierro-oxidantes, capaces de acelerar millones de veces la oxidación de Fe(II) en medio ácido (ecuación (6)), donde el proceso químico es muy lento.

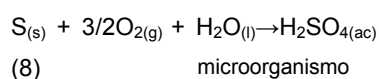


El ion Fe(III) ataca al CuS a través de un proceso exclusivamente químico. Aunque el proceso es bastante complejo y depende del tipo de sulfuro [4,5], en forma simplificada se muestra en la ecuación (7):



el ion Fe(II) puede ser re-oxidado (ecuación (6)) por acción microbiana para volver a atacar al sulfuro. Existen un numeroso grupo de microorganismos hierro oxidantes que pertenecen a dos dominios diferentes: bacterias y arqueas; a su vez, es posible

clasificarlos según el rango óptimo de temperatura en el que se desarrollan en mesófilos (rango óptimo de crecimiento 25-35 °C), termófilos moderados (35-50 °C), termófilos (50-70 °C) e hipertermófilos (mayor a 70 °C). Entre los microorganismos hierro oxidantes se destacan bacterias mesófilas como *Acidithiobacillus ferrooxidans* (capaz de oxidar Fe(II) y también S) y *Leptospirillum ferrooxidans* (sólo capaz de oxidar Fe(II)), algunas bacterias termófilas moderadas como *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* y arqueas pertenecientes a los géneros *Ferroplasma* (mesófilos), *Sulfolobus* y *Acidianus* (termófilos), entre otros. En los procesos de biolixiviación, también juegan un rol relevante los microorganismos azufre oxidantes, capaces de oxidar azufre elemental (y otros compuestos reducidos de azufre) generando ácido sulfúrico (ecuación (8)) que contribuye a la disolución de los sulfuros. Entre ellos se destacan *Acidithiobacillus thiooxidans* (bacteria mesófila) y *Acidithiobacillus caldus* (bacteria termófila moderada) aunque también algunos de los microorganismos hierro oxidantes (como se indicó más arriba para *A. ferrooxidans*), también son capaces de oxidar azufre.



En la Figura 1 se muestran imágenes de algunos

microorganismos relevantes en los procesos biomineros incluyendo una nueva especie de arquea recientemente aislada por nuestro grupo.

La acción microbiana, que es esencialmente de naturaleza indirecta, puede ejercerse desde la solución (es decir, los microorganismos en suspensión, oxidan Fe(II) y el Fe(III) formado actúa sobre el sulfuro metálico) en un mecanismo denominado "sin contacto" pero se reconoce mucho más eficiente el mecanismo "de contacto" donde los microorganismos están adheridos sobre la superficie a través de una capa de polímeros que excretan (exopolímeros) de unos pocos nanómetros y que constituye el espacio donde tiene lugar la oxidación de Fe(II) y el ataque de Fe(III) sobre la superficie mineral. Debido a esto la colonización de la superficie, la capacidad de excretar exopolímeros y de formar películas (biofilms) sobre la superficie, tienen una incidencia directa sobre la eficiencia de la acción microbiana. La Figura 2 muestra el ataque de un mineral por microorganismos que previamente colonizaron la superficie.

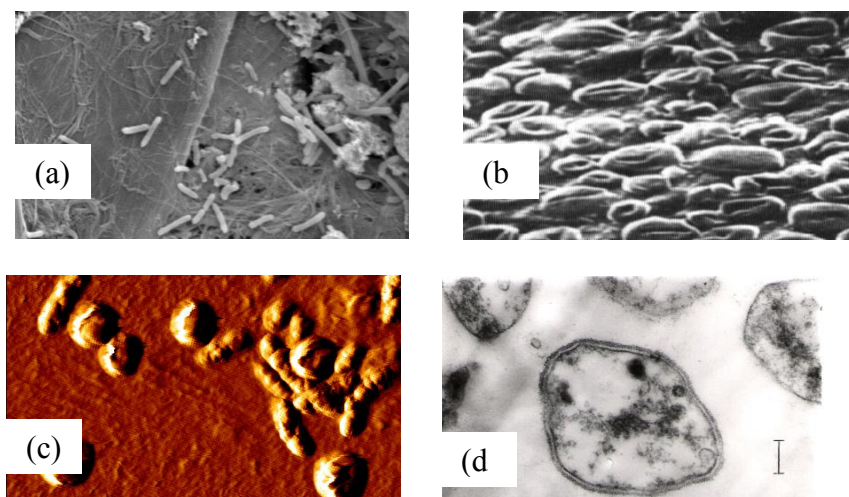


Figura 1. Imágenes de células de *Acidithiobacillus caldus* (a), *Sulfobolus metallicus* (b), arqueas y bacterias (c) y *Acidianus copahuensis* (d). Las dos primeras son imágenes SEM (microscopio electrónico de barrido), la tercera es imagen AFM (microscopio de fuerza atómica) mientras que la cuarta es TEM (microscopio electrónico de transmisión)

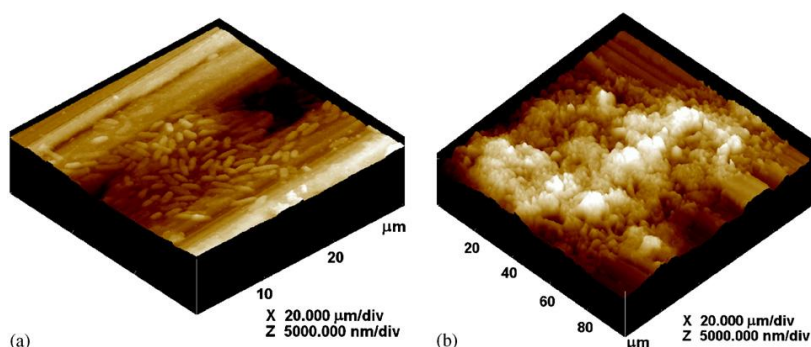


Figura 2. Imágenes AFM de la superficie de pirita colonizada por células de *A. ferrooxidans* (a) y luego del ataque (b).

En la biolixiviación, la acción microbiana solubiliza al metal de interés. No obstante, en algunos casos, el metal no puede disolverse por la acción de los microorganismos hierro y/o azufre oxidantes (necesita una oxidación más energética que la que aquellos

microorganismos pueden aportar), pero es posible utilizar esa acción microbiana para mejorar la eficiencia de extracción del mismo. El caso más emblemático es el del oro que suele estar presente como

partículas muy pequeñas (menores a 60 micrones) insertas en una matriz sulfurada. En estas condiciones, la disolución de oro utilizando cianuro (u otros lixiviantes) es muy poco eficaz porque el oro está pobremente expuesto (estos minerales se denominan refractarios). Para exponer el oro y poder disolverlo apreciablemente, debe destruirse la matriz sulfurada y esto es posible hacerlo por la acción microbiana descrita. En este caso, cuando la acción microbiana no disuelve la especie de interés pero la libera, denominamos al proceso biooxidación.

A nivel comercial, la biolixiviación se aplica fundamentalmente para la recuperación de cobre [6]. Mayoritariamente este proceso se realiza en pilas que son regadas con soluciones diluidas de ácido. Estas pilas son montones de mineral (o de concentrado), con forma trapezoidal, de centenas de m² de superficie y de 6-20 m de altura, que se montan sobre capas plásticas de alta densidad. En las pilas, las partículas están sólo trituradas (de tamaño del orden de centímetros o milímetros) y eventualmente agregadas por previa humectación con soluciones de ácido. Los lixiviados son recogidos en la parte inferior y enviados para la recuperación del cobre lo que, usualmente se hace por electrólisis previa separación del

hierro a través de una extracción con solventes. Los procesos en pilas pueden durar meses o incluso años. Este tipo de aplicaciones puede encontrarse en muchos países del mundo destacándose Chile, Australia y EEUU. La biolixiviación en pilas también se aplica a escala experimental para recuperar otros metales como cinc y níquel mientras que la biooxidación se utiliza en unos pocos casos para beneficiar minerales refractarios de oro.

Es posible incrementar significativamente la velocidad utilizando tanques agitados en lugar de pilas. En este caso el mineral es finamente molido y además mantenido en suspensión con agitación mecánica (posible en tanques de hasta 500 m³) o neumática. El diseño experimental usual son 5-6 tanques en serie y el mineral es traspasado de un tanque al siguiente; en este caso, el aumento de la superficie expuesta disminuye los tiempos a unos pocos días. No obstante, los costos de la molienda necesaria, sólo hacen posible el uso de tanques cuando el metal a recuperar tiene un alto costo de mercado; esto reduce su uso casi exclusivamente al caso de la biooxidación de minerales refractarios de oro, tal cual puede encontrarse en plantas en varios países tales como Uganda, China, Australia, Ghana, entre otros. Las más grandes son capaces de procesar más de 2000 toneladas diarias de

concentrado y utilizan tanques de más de 1.000.000 litros. Debido a los costos, sólo se utilizan tanques agitados para otros metales en una planta comercial de biolixiviación de cobalto en Uganda y en otra experimental para recuperar cobre a partir de concentrados en Chile. La Figura 3 muestra fotos de procesos biomineros en pilas y en tanques.

c) *Operaciones en la remediación ambiental: biorremediación*

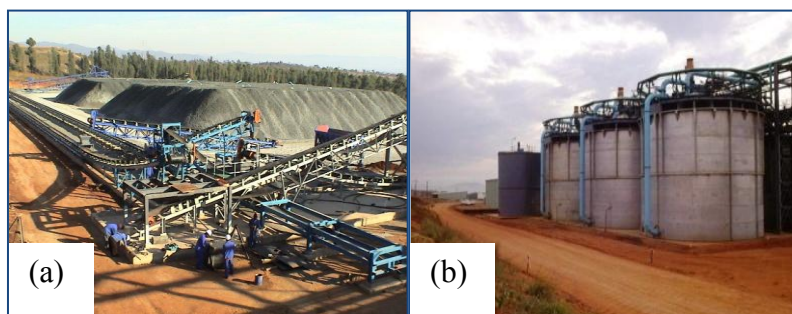


Figura 3. Planta de biolixiviación en pilas (a) y de biooxidación en tanques agitados (b)

La actividad minera como prácticamente todas las actividades productivas a gran escala, produce serios impactos en el medio ambiente. En el caso de la minería metalífera, y dependiendo del tipo de operación y de los cuidados o prevenciones que se tengan al desarrollarla, existen diversos tipos de influencia ambiental negativa, que incluyen desde problemas hidrogeológicos, problemas con el agua requerida para las operaciones, hasta liberación de contaminantes. Una

de las peores consecuencias de la actividad minera metalífera es la generación de drenajes ácidos que consiste en drenajes muy ácidos con altas concentraciones de metales pesados que se produce por la oxidación de sulfuros metálicos (Fig.2); esta oxidación puede ser simplemente química pero usualmente es mediada por los mismos microorganismos que describimos en secciones precedentes que están asociados a los minerales; esta acción microbiana se facilita

por la disminución del tamaño de partícula sumado al fácil acceso de oxígeno y agua ocasionados por la actividad minera. Una minería responsable implicaría los cuidados necesarios para evitar la formación de dichos drenajes; no obstante, existen un elevado número de pasivos mineros (residuos y restos de explotaciones mineras antiguas que fueron cerradas sin los cuidados pertinentes) que presentan -o potencialmente podrían presentar- esos drenajes. La biominería puede aportar soluciones a estos drenajes

ácidos que tienen ciertas ventajas –fundamentalmente económicas y ambientales– frente a los tratamientos fisicoquímicos tradicionales. Esta área de la biominería se encuadra dentro de la biorremediación de metales pesados que consiste en el tratamiento de los metales pesados utilizando actividad biológica o materiales biológicos inertes [7,8]. En el caso de los metales, como no pueden ser degradados, los tratamientos de biorremediación (que se pueden aplicar también en situaciones no vinculadas con la minería) son esencialmente de tres tipos: movilización para separarlos de una matriz sólida que debe remediarse, inmovilización para retirarlos de un cuerpo líquido contaminado y/o transformación a una especie menos tóxica (y/o de diferente movilidad). En este último caso, la actividad microbiana puede reducir u oxidar una especie metálica para modificar su posible impacto; dos casos típicos son los del cromo hexavalente (especie cancerígena y mutagénica) que es reducido a cromo trivalente y el arsénico trivalente (fuertemente tóxico) oxidado a arsénico pentavalente (menos tóxico y más fácil de inmovilizar por precipitación). Aunque potencialmente importantes, estas transformaciones todavía no se aplican a escala masiva salvo en casos muy específicos.

Cuando se trata de movilizar metales de matrices sólidas (desde lodos hasta materiales agotados), pueden utilizarse procesos de biolixiviación similares a los descritos, especialmente si se trata de residuos provenientes de tratamientos anaeróbicos donde, en general, los metales están bajo la forma de sulfuros. Si los metales se encuentran bajo otra forma química, los procesos de biolixiviación deben modificarse para permitir la solubilización; así, para carbonatos y óxidos, usualmente se utilizan microorganismos que generan ácidos inorgánicos u orgánicos y para compuestos de baja solubilidad en ácidos o en medios oxidantes, suele aprovecharse la capacidad de algunos microorganismos de generar complejantes orgánicos que secuestran el metal y lo retienen en solución. Una vez que los metales son movilizados y la carga metálica ha descendido a niveles aceptables, los sólidos pueden ser dispuestos ambientalmente. En el caso particular de suelos contaminados con metales pesados, estas metodologías de disolución no son posibles porque implicaría la remoción de enormes cantidades de tierra y porque usualmente los suelos tratados con cualquiera de los agentes mencionados, pierden su funcionalidad y viabilidad. Una alternativa en

estos casos, es el uso de la fitorremediación que implica la extracción y/o la estabilización de los metales por acción de determinadas plantas o árboles. En general, de todos los mecanismos que pueden operar en la fitorremediación, el más apreciado es la extracción del metal y su traslado a las partes aéreas de la planta (tallo, hojas) que luego pueden ser cosechadas llevándose la carga metálica del suelo. Estas biomasa aéreas son posteriormente quemadas en condiciones controladas y las cenizas con alto contenido metálico son preservadas para algún uso posterior. De este modo, se reducen significativamente (20-100) los volúmenes contaminados. En el caso de cursos líquidos o efluentes provenientes de procesos industriales (entre los cuales, se incluye el caso de los drenajes ácidos), la biorremediación consiste en la retención de los metales. En este caso, existen dos metodologías dominantes: biosorción y bioprecipitación. La primera implica la concentración de metales sobre (o dentro de) la biomasa que luego puede separarse del líquido. La biosorción puede ser un proceso no metabólico vinculado con la acción de los diversos grupos funcionales que están sobre la superficie celular como un

proceso metabólico donde – usualmente como parte de sus mecanismos de resistencia– los microorganismos aíslan a los metales en compartimentos dentro de sus células. Si bien ambos pueden usarse para la biorremediación de metales, el primero tiene evidentes ventajas ya que no requiere ningún aporte de sustratos ni acondicionamientos particulares para el crecimiento microbiano; sólo se utilizan biomasas baratas y abundantes (usualmente residuos o biomasas sin otro uso) que retienen metales a través de diversos procesos de naturaleza fisicoquímica (adsorción, intercambio iónico, etc.). Una vez saturada la biomasa, la misma puede ser reutilizada previa desorción controlada. Biomasas capaces de retener distintos metales se comercializa en el mercado de modo similar a las resinas de intercambio iónico pero a precios muy inferiores [9]. Finalmente, la bioprecipitación implica la producción microbiana de ciertos metabolitos capaces de precipitar con los metales presentes. Si bien hay varios casos distintos, el más reconocido es el de los microorganismos sulfato-reductores. Estos microorganismos que crecen en ausencia de oxígeno (anaeróbicos) son capaces de reducir iones sulfato a sulfuro, oxidando a la vez compuestos orgánicos simples; los iones sulfuro forman compuestos insolubles con

muchos metales pesados lo que permite separarlos del efluente líquido. Este proceso se ha aplicado para detener plumas de contaminación subterráneas y para procesos de remediación en casos puntuales donde se cumplían las condiciones para cultivar estos microorganismos.

En el caso de los drenajes ácidos (y también para otras situaciones) es posible utilizar la suma de muchos de estas metodologías de biorremediación e, incluso, incluir otros procesos abióticos (es decir, sin intervención microbiológica) en los llamados humedales. Se trata de piletas naturales o artificiales que contienen material biológico y eventualmente plantas (usualmente acuáticas) que conjuntamente con los microorganismos existentes, producen procesos de sorción, precipitación y extracción como los descritos en los párrafos precedentes, cuando los drenajes o los efluentes contaminados son obligados a atravesarlos.

EL FUTURO DE LA BIOMINERÍA

A pesar de las aparentes ventajas que presenta la biominería sobre las otras alternativas, fundamentalmente desde el punto de vista ambiental, y que los nuevos depósitos minerales descubiertos tienen bajas leyes haciendo aún menos rentables las operaciones pirometalúrgicas, el impacto de esta tecnología en las opera-

ciones comerciales, es relativamente bajo (15 % de la producción mundial para el caso del cobre y 5 % para el oro, siendo prácticamente despreciable para el resto de los metales). Existen varias razones por las cuales, la biominería no se ha extendido y algunas escapan al objetivo de este artículo [10]. No obstante, la más relevante tiene que ver con la velocidad del proceso que, aunque pueden acelerarse reduciendo el tamaño de partícula o mejorando el diseño ingenieril, encuentra como máxima limitación las características metabólicas y fisiológicas de los microorganismos. Sin dudas, los procesos extractivos podrían mejorarse significativamente en velocidad y en eficiencia, a menores valores de pH (recordemos que la disolución de ciertos sulfuros es facilitada en esas condiciones) e incluso a mayores valores de temperatura (todos los procesos químicos aumentan su velocidad a medida que aumenta la temperatura pero, además, los procesos extractivos en minería son exotérmicos y la temperatura crece naturalmente). Para la modificación de estas y otros parámetros durante el proceso extractivo, los microorganismos utilizados deberían ser capaces de desarrollarse adecuadamente bajo esas condiciones.

En las últimas décadas, la modificación genética de los microorganismos se convirtió en una herramienta fundamental

para el mejoramiento de procesos biotecnológicos en muchas áreas. Sin embargo, en procesos como los de la biominería, que se desarrollan esencialmente “a campo”, bajo condiciones no completamente controladas y en ambientes no estériles, se descarta cualquier intento de mejoramiento genético de las especies. La principal razón es que aún los mejores microorganismos bajo condiciones controladas de laboratorio, tienen una escasa chance de sobrevivir y competir exitosamente con las poblaciones nativas que se han adaptado a crecer y desarrollarse en las condiciones ambientales donde se pretende realizar el proceso. En cambio, la naturaleza ha tenido millones de años de evolución generando una amplísima diversidad de microorganismos que se han adaptado a crecer en una enorme variedad de condiciones incluyendo aquellas “extremas” desde el punto de vista humano y que convierten a esos organismos en extremófilos. Existen extremófilos capaces de crecer desde temperaturas muy bajas hasta temperaturas superiores a 120 °C (obviamente, a presiones muy superiores a la atmosférica), a presiones muy bajas pero también a presiones superiores a 400 atmósferas, bajo diferentes tipos de radiaciones, en medios con valores de pH entre 0,5 y 11,

concentraciones muy elevadas de sales y de metales pesados, etc. Es por eso que la búsqueda de extremófilos o de comunidades extremófilas constituye frecuentemente el punto de partida para mejorar procesos biotecnológicos de interés o incluso para generar nuevos procesos. En el caso de la biominería, como se ha indicado, son importantes los extremófilos con determinadas características fisiológicas pero que además se desarrollen en medios con bajos valores de pH (acidófilos), a altas temperaturas (termófilos o hipertermófilos) y que sean muy resistentes (o al menos, tolerantes) a altas concentraciones de metales pesados. En nuestro grupo de investigación, así como en muchos otros en el mundo, esa búsqueda se ha centrado en lugares termales (vinculados a la actividad volcánica), pasivos mineros y lugares contaminados con metales pesados, y ha permitido encontrar microorganismos más eficientes que los tradicionales [11,12].

Por otro lado, la fuerte presión de la sociedad para disminuir el impacto ambiental de la minería, ha puesto el foco en la necesidad de disminuir las operaciones mineras tanto como sea posible. Las estrategias más relevantes de la metalurgia extractiva implican la extracción de rocas de la mina, generando enormes hoyos en el lugar de la mena (en

el caso de la minería a cielo abierto) o grandes extensiones de túneles y galerías (en la minería subterránea) que provocan cambios hidrogeológicos (y paisajísticos) significativos; a esto deben sumarse operaciones de acondicionamiento del mineral (trituración y molienda) que generan polvo y alto impacto ambiental. La perspectiva de contar con microorganismos más eficientes y rápidos, abre la posibilidad de implementar estrategias “in situ”, donde fracturas controladas dentro de la mena permiten el drenaje de soluciones lixiviantes y microorganismos para actuar en todo el cuerpo minero; los lixiviados son posteriormente retirados para la recuperación de los metales solubilizados. Estas operaciones “in situ” auxiliadas por la acción de microorganismos lixiviantes de alta eficiencia, permitirían una minería capaz de extraer de los recursos naturales necesarios para el mantenimiento del estándar tecnológico de nuestra sociedad moderna, y con un mínimo impacto ambiental.

REFERENCIAS

- [1] K. Halada, M. Shimada, K. Iijima, Forecasting of the consumption of metals up to 2050, *Materials Transactions*, **2008**, *49*, 402-410.
- [2] T.E. Graedel, J. Allwood, J.-P. Birat, M. Buchert, C.

- Hageluken, B.K. Reck, S.F. Sibley, G. Sonnemann, What do we know about metal recycling rates?, *Journal of Ecology* **2011**, *15*, 255-366.
- [3] C.G. Cunningham, D.A. Singer, J.A. Briskey, D.M. Sutphin, V.I. Berger, K.J. Schulz, E.O. Zappettini, M. Gajardo, A. Días, C. Portigliati, R. Carrasco, W. Vivallo. Quantitative mineral resource assessment of copper, molybdenum, gold, and silver in undiscovered porphyry copper deposits in the Andes mountains of South America, *Society of Economic Geology Newsletter* **2007**, *71*, 8-13.
- [4] E.R. Donati, W. Sand, *Microbial processing of metal sulfides*, Springer, Dordrecht, 2007.
- [5] L.G. Santos Sobral, D. Monteiro de Oliveira, C. E. Gomez de Souza, *Biohydrometallurgical processes: a practical approach*, CETEM, Río de Janeiro, 2011.
- [6] D.B. Johnson, Biomining-biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials, *Current Opinion in Biotechnology* **2014**, *30*, 24-31.
- [7] A. Malik, Metal bio-remediation through growing cells, *Environment International* **2004**, *30*, 261-278.
- [8] M. Viera, E. Donati, Microbial processes to metal recovery from waste products, *Current Topics in Biotechnology* **2004**, *1*, 117-127
- [9] J. Plaza Cazón, C. Bernardelli, M. Viera, E. Donati, E. Guibal, Zinc and cadmium biosorption by untreated and calcium-treated *Macrocystis pyrifera* in a batch system, *Bioresource Technology* **2012**, *116*, 195-203.
- [10] C.L. Brierley, How will biomining be applied in future?, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **2008**, *18*, 1302-1310.
- [11] M.S. Urbietta, E. González Toril, A. Aguilera, M.A. Giaveno, E.R. Donati, First prokaryotic biodiversity assessment using molecular techniques of an acidic river in Neuquén, Argentina *Microbial Ecology* **2012**, *64*, 91-104.
- [12] M.S. Urbietta, E.R. Donati, K.-G. Chan, S. Shahar, L.L. Sin, K.M. Goh, Thermophiles in the genomic era: Biodiversity, science, and applications, *Biotechnology Advances* **2015**, en prensa.