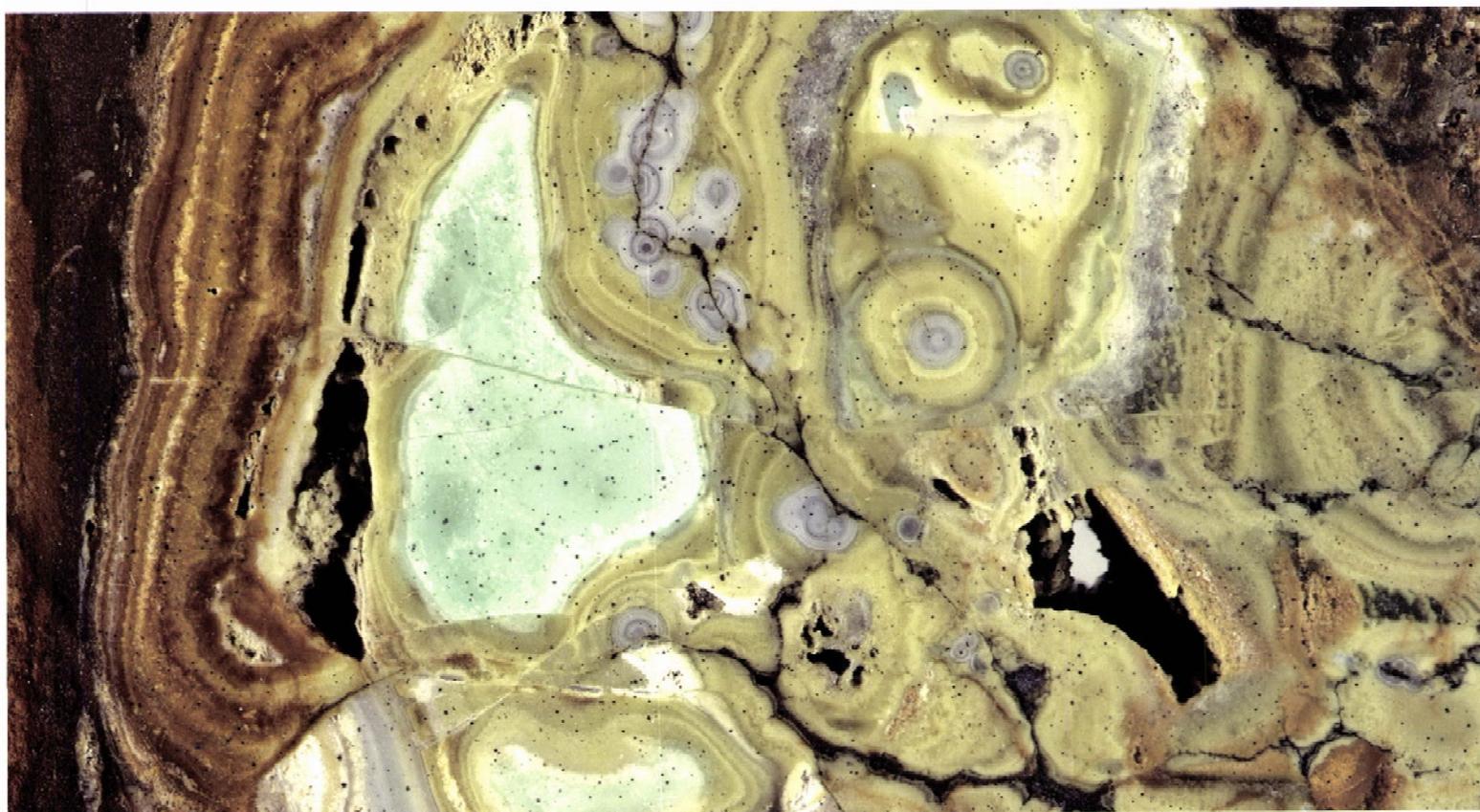


Lixiviación Bacteriana:

Biología y Modelación Matemática al Servicio de la Industria Minera



A medida que avanza el desarrollo tecnológico en los procesos productivos de la minería cuprífera, surgen nuevos métodos que prometen recuperar cobre de minerales que hoy no son viables económicamente. La lixiviación bacteriana es la gran apuesta. Y así lo entendieron los científicos del Instituto Milenio de Dinámica Celular y Biotecnología de la FCFM, que desde el 2003 están realizando estudios pioneros sobre microorganismos que pueden hacer más eficiente y rápida la recuperación del metal rojo.

La principal industria del país, el cobre, está en constante búsqueda de proyectos de investigación e innovación tecnológica que le permitan lograr una producción más eficiente y sustentable.

Fue así como surgió la biolixiviación, utilización de bacterias para disolver el mineral. Ésta pretende incrementar las reservas mineras al posibilitar la explotación de recursos de baja ley, que hoy no son rentables.

De acuerdo con estimaciones, la aplicación de la biolixiviación a la totalidad del cobre que se produce en Chile disminuiría los costos de producción en un 50% y se cuadruplicarían las reservas económicamente explotables del país.

Precisamente la relevancia del tema llevó a los ingenieros químicos y biotecnólogos del "Instituto Milenio de Dinámica Celular y Biotecnología (ICDB): Un Centro de Biología de Sistemas", albergado en la FCFM, a estudiar el metabolismo de bacterias lixiviantes, su modelación matemática y su interacción con el mineral, con el objetivo de conocer mecanismos que ayuden a una disolución más eficiente.

"Desde el año 2003 estamos realizando estudios en esta área porque reconocemos la importancia del cobre para Chile. Y como es parte de la esencia del Instituto desarrollar soluciones a problemas

científicos nacionales, las investigaciones de frontera que hemos llevado a cabo en esta materia, debieran tener resultados económicos importantes para la minería cuprífera", señala el Dr. Juan Asenjo, académico del Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología de la FCFM y Director del ICDB.

BIOLIXIVIACIÓN

La lixiviación biológica; más conocida como biolixiviación, es el procesamiento de minerales en el cual intervienen bacterias. Éstas al entrar en contacto con el mineral, lo disuelven mediante una reacción de oxidación a partir de la cual se puede recuperar el cobre como metal.

En comparación con los métodos no biológicos, esta tecnología microbiana permite el tratamiento de minerales de baja ley que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales, es más amigable con el medio ambiente debido a la ausencia de polución durante el proceso y presenta bajos costos en las operaciones hidrometalúrgicas.

Sin embargo, también existen problemas. "No todo mineral se disuelve fácilmente. Por ejemplo, el mineral más abundante de cobre - la calcopirita - es el más resistente. Hay problemas prácticos que impiden recuperar el cobre en un tiempo prudente. La idea es lograrlo en un período razonable y tratar de extraer, al menos, un 90% del cobre existente en ese mineral,

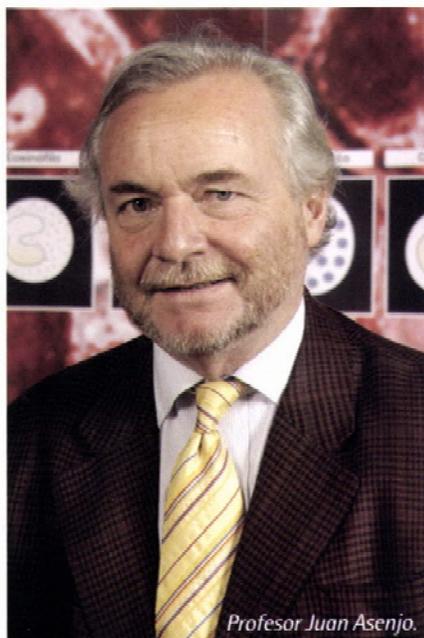
pero no es fácil", indica el Dr. Álvaro Olivera, investigador joven del ICDB.

Actualmente sólo un 2% del cobre del mundo y un 5% del que se produce en Chile se logra a través de este proceso. El desafío es incrementar este método de producción, pero para lograrlo se necesita conocer mejor a estas bacterias. Labor que están desarrollando los investigadores del ICDB.

EL INTERIOR DE LA BACTERIA

"El problema de este tipo de bacterias, es que se conocen poco. Por lo que debemos empezar a buscar qué es lo que pasa dentro de ellas, reconstruir su metabolismo", indica el Dr. Olivera.

La idea es construir modelos metabólicos de bacterias biolixiviantes, es decir, conocer las reacciones bioquímicas que están ocurriendo en su interior y, de paso, ver cómo reaccionan frente a lo que ocurre en el medio externo y cómo a su vez lo modifican. "Las bacterias biolixiviantes toman elementos del medio para obtener su energía y lo cambian de tal manera que a nosotros nos sirve porque permiten que el mineral se disuelva más rápido. Entonces si tenemos el modelo metabólico, éste te dice que para que lo modifique de tal manera, en tales condiciones, se necesita una bacteria que haga tales cosas adentro", señala Olivera. "La gracia de un modelo metabólico -agrega el Dr. Asenjo- es



Profesor Juan Asenjo.

“El modelo, que nunca se había hecho en el mundo, es capaz de simular los principales aspectos del metabolismo y será útil para la investigación y la mejora de los procedimientos de biolixiviación”, explica el Dr. Asenjo

que sólo midiendo lo que pasa afuera, puedes predecir lo que ocurre adentro”.

El año 2003 se produjo el primer acercamiento a este tipo de estudio, cuando el estudiante de doctorado Ramón González realizó un modelo metabólico de la levadura. La investigación pretendía conocer cuáles eran las diferencias entre una levadura que no producía proteína recombinante (SOD) y otra que sí lo hacía, de modo de optimizar la producción de SOD en base a lo que ocurría al interior de la levadura. “Al final se logró optimizar una estrategia de cultivo de esa levadura para obtener el mayor rendimiento posible de SOD en el menor tiempo”, indica el Prof. Juan Asenjo.

Estos análisis de flujos metabólicos, también se pueden aplicar a las bacterias lixiviantes para que la modificación que realicen del medio sea la óptima para aumentar la disolución del mineral, hacerlo más rápido y eficiente. Al respecto, el Dr. Olivera señala que, “es una estrategia que no se ha usado antes. En este caso la optimización viene por el lado de las bacterias, que necesitamos ponerle al medio -al ácido que sale de los regadores de las pilas de mineral- para que la bacteria lo modifique de manera que el cobre se disuelva óptimamente. Por otro lado, qué bacteria funcionaría mejor, cuál tiene las mejores vías para modificar el medio de tal manera que se obtenga una mejor disolución, etc.”.

El siguiente paso lo dio el estudiante de postgrado Christoph Hold, quien junto a la Dra. Barbara Andrews y al Dr. Asenjo, desarrolló

un modelo estequiométrico -de 62 ecuaciones químicas- del metabolismo de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, bacteria lixiviante más conocida. Éste le permitió conocer cuáles son las reacciones que hay dentro de la bacteria. “El modelo, que nunca se había hecho en el mundo, es capaz de simular los principales aspectos del metabolismo y será útil para la investigación y la mejora de los procedimientos de biolixiviación”, explica el Dr. Asenjo. Hold descubrió cómo es el sistema a través del cual estos microorganismos obtienen energía de iones y que un ciclo (TCA) que en los humanos funciona en un sentido, en ellos es al revés. Con estos antecedentes se puede construir el modelo de cómo la célula obtiene su energía y cómo puede ir aumentando su masa de manera de dividirse y reproducirse. Ese mecanismo de obtención energética es el mismo que indirectamente termina haciendo que el mineral se disuelva.

Para el Prof. Asenjo, es importante que en un país como Chile, los estudiantes de doctorado, que realizan investigación de primer nivel, tengan contacto con la industria. Éste es el caso de María Paz Merino, quien está realizando, al igual que Hold, un modelo estequiométrico, pero esta vez de la bacteria *Leptospirillum ferrooxidans*, que comprende 84 ecuaciones químicas. “Le presentamos la idea a BioSigma -filial de Codelco- y les interesó porque este microorganismo existe en las plantas mineras de los reactores que están empezando a instalar en Codeleo. Actualmente María Paz está haciendo experimentos en BioSigma para encontrar los parámetros del cultivo mixto con el que trabajan, óxido y sulfuro”, indica.

EL APORTE DE LA MATEMÁTICA

La matemática también cumple un rol importante en el proceso de lixiviación bacteriana, al desarrollar modelos matemáticos para estos sistemas biológicos. En el Instituto Milenio de Dinámica Celular y Biotecnología (ICDB), un grupo de ingenieros matemáticos encabezados por el Dr. Carlos Conca, académico del Departamento de Ingeniería Matemática de la FCFM y Premio Nacional de Ciencias Exactas 2003, estudian los sistemas de ecuaciones que definen los modelos desarrollados por los ingenieros químicos y biotecnólogos de las bacterias lixiviantes. Analizan la consistencia matemática de las ecuaciones, su comportamiento, cómo se pueden resolver, qué tipo de soluciones se pueden esperar y cuáles van a ser los problemas para resolverlas. La idea es aplicar estos modelamientos matemáticos de sistemas biológicos a las pilas de cobre.

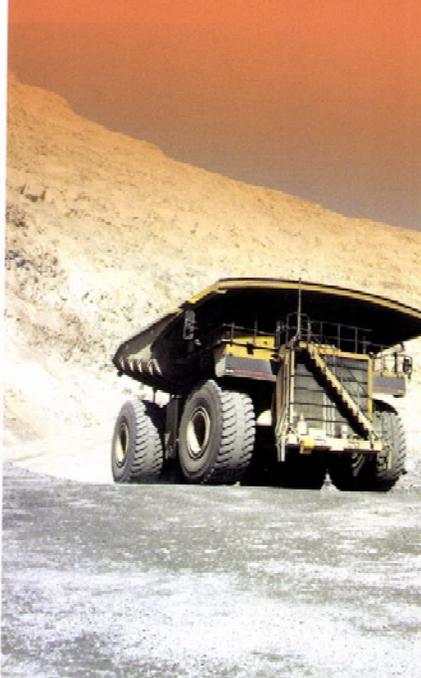
Por otra parte, el Centro de Modelamiento Matemático de la FCFM, a través del Laboratorio de Bioinformática y Matemática del Genoma (LBMG), en 2003 suscribió un convenio de cooperación científica con BioSigma. Desde el área de la bioinformática y de la modelación matemática, le brinda apoyo a los desarrollos tecnológicos en biominería. El LBMG, dirigido por el académico del Departamento de Ingeniería Matemática de la FCFM, Alejandro Maass, y su contraparte, iniciaron el estudio del comportamiento de bacterias biomineras, el que llevó a la creación de sistemas de monitoreo de estos microorganismos.

BIOLIXIVIACIÓN EN RADOMIRO TOMIC

Con una inversión de US\$ 5,5 millones, en septiembre de este año la mina Radomiro Tomic, perteneciente a la división Codelco Norte, comenzará a operar una planta de biolixiviación que será la primera del mundo en su tipo a nivel industrial, ya que está orientada a extraer cobre de yacimientos mixtos de baja ley, sulfuro y óxido.

El diseño y desarrollo de la planta está a cargo de BioSigma, filial de Codelco, que mantiene una sociedad con la compañía japonesa Nippon Mining & Metals.

La iniciativa contempla procesar cerca de 20 millones de toneladas de mineral. Para ello, utilizarán dos biorreactores en los que se harán proliferar las bacterias Wenelén, Licanantay y Yagán, patentadas por BioSigma. El proyecto considera un tiempo inicial de operación de 30 meses.



El investigador Álvaro Olivera.

BIOFILM

Para lograr optimizar la disolución de los minerales no sólo es importante conocer lo que ocurre al interior de la bacteria, sino también lo que pasa fuera de ella. El Dr. Álvaro Olivera realizó la primera investigación sobre un biofilm aplicado a procesos de lixiviación bacteriana. Cuando las bacterias crecen pueden hacerlo flotando en un líquido o, lo más común, apoyadas sobre la superficie del mineral. Así van formando una especie de alfombra y, a medida que se reproducen, el biofilm empieza a tomar distintas morfologías, no sólo expandiéndose sino también engrosando, lo que puede dificultar la disolución del mineral.

Para evitarlo, Olivera modeló el proceso de interacción de las bacterias con el mineral. "Este trabajo es el modelamiento, ya no del interior de una bacteria, sino de cómo interactúa con el mineral y cómo se va formando la capa insoluble sobre éste y cómo las bacterias bajo ciertas condiciones pueden ayudar a eliminar esa alfombra y bajo otras condiciones es al revés", explica.

Este modelamiento permitiría optimizar qué clases de bacterias deberían formar la alfombra y qué tipos no, qué hacer para que las bacterias ayuden a limpiar la capa y así aumentar la disolución del cobre y cómo evitar que la

morfología de la alfombra impida la salida o entrada de productos al mineral.

"Por ejemplo, modelamos lo que ocurre en el mineral con y sin bacterias. Después de seis días el porcentaje de aumento de recuperación de cobre con el proceso de biolixiviación y con poco hierro en el medio, es de más de un 30% extra de cobre. Entonces no basta con tener bacterias, también depende del medio, si tiene más o menos hierro", indica.

Para el Dr. Olivera se deben lograr bacterias, especies de bacterias o bacterias modificadas, que sean capaces de limpiar a una velocidad establecida la capa insoluble. "También se puede modificar el medio para cambiar la morfología de la alfombra de bacterias y así obtener mejores disoluciones del mineral", agrega.

Para el Dr. Juan Asenjo, Premio Nacional de Ciencias Aplicadas 2004, los avances en estas investigaciones de frontera no sólo permiten la sustentabilidad de la minería en el largo plazo, sino también "posicionan a Chile y a sus científicos en un sitio de privilegio en la biominería. Área en que el Instituto de Dinámica Celular y Biotecnología posee un equipo interdisciplinario de excelencia que ha realizado y seguirá haciendo contribuciones tan importantes para la economía del país", concluye el destacado investigador. 

Texto: Ana María Sáez C.