

El uso de bacterias en la minería

The use of bacteria in mining

Anette Dezha-Bomaye

de363060@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0007-9099-6540>

Sylvia Martínez-Hernández

sylvia_martinez@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3313-4318>

Victor Manuel Bravo-Cuevas

vbravo@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6395-7147>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Recibido: 2 de agosto de 2023.

Aceptado: 30 de agosto de 2023.

Publicado: 5 de enero de 2024.

<https://doi.org/10.29057/h.v6i1.n1439>

Resumen

La minería en México es una de las actividades económicas de mayor tradición con importancia a escala mundial en relación con la producción de minerales metálicos de interés comercial, como la plata (Ag), oro (Au) y cobre (Cu). Hidalgo es un estado con una larga historia minera, siendo el municipio de Zimapán una de las principales zonas que desarrolla esta actividad. Esta región se enfoca principalmente en la extracción de minerales metálicos por lixiviación, utilizando solventes químicos que afectan potencialmente al ambiente. La biolixiviación representa un método alternativo, viable y sustentable que reduce o elimina el uso de solventes tóxicos y aplica bacterias como agentes lixiviantes.

Palabras clave: Minerales metálicos, extracción, lixiviación, biolixiviación, bacterias.

Abstract

Mining is a traditional economic activity in Mexico, considering the high production of metallic minerals of commercial value, such as silver (Ag), gold (Au), and copper (Cu). The state of Hidalgo has a long mining history, including the Municipality of Zimapán as an important mining district. This region focuses on obtaining metallic minerals by lixiviation, using chemical solvents that cause environmental affectations. Considering this, biolixiviation is a suitable alternative and sustainable method to reduce or eliminate the application of chemical solvents, applying bacteria as lixiviant agents.

Keywords: Metallic minerals, mining, lixiviation, biolixiviation, bacteria.

Panorama general de la Minería en México

México tiene una amplia tradición minera que se remonta a la época prehispánica. Esta actividad ha jugado un papel importante en el desarrollo económico, político, social y cultural del país (Azamar-Alonso y Téllez-Ramírez, 2022). El potencial mineralógico del territorio nacional se relaciona estrechamente con su evolución geológico – tectónica, la cual a su vez da cuenta de su compleja geomorfología y de la asombrosa biodiversidad que aloja (Bravo-Cuevas *et al.*, 2021). A nivel mundial, México está ubicado entre los 10 países más importantes en la industria minera, así como en los primeros lugares en la producción de plata (Ag) y otros minerales nativos de importancia económica, tales como el oro (Au) y el cobre (Cu).



Compañía minera en el Municipio de Zimapán Hidalgo.
Fotografía: Anette Dezha-Bomaye.

En este sentido, la minería representa el 2.3% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y el 8.1% del PIB industrial (CAMIMEX, 2020). La reforma de la Ley Minera y el otorgamiento masivo de concesiones condujo a un aumento importante de la superficie del territorio nacional para la exploración minera (Azamar-Alonso y Téllez-Ramírez, 2022). En consecuencia, la explotación de los recursos minerales tiene un impacto importante en el ambiente y, por lo tanto, amerita valorarse.

Con base en lo anterior y a la creciente demanda de metales a nivel mundial, es que se han buscado estrategias de extracción más amigables con el ambiente, tal es el caso de la biolixiviación, la cual, por el uso reducido de productos químicos, la baja producción de materiales de desecho y un menor consumo de energía, se ha aplicado exitosamente para tal efecto. Países como Chile han aplicado esta estrategia en minas de cobre y se observó en el 2010 que el 42% de la producción chilena de este metal, procedente de extracción por solventes fue atribuible a la biolixiviación (Roberto y Schippers, 2022). Infortunadamente, esta estrategia es poco conocida y aplicada en nuestro país, representando así un área de oportunidad para optimizar y minimizar el impacto ambiental que genera la industria minera.

El Distrito Minero de Zimapán

Hidalgo cuenta con 500 años de historia minera y se considera un estado importante en el desarrollo de esta actividad en México (SGM, 2021). Los procesos morfotectónicos asociados a la configuración del territorio hidalguense confieren a esta región del centro de México una extensa geodiversidad, en la cual los minerales son un componente importante (Poch y Canet, 2018). La actividad minera en Hidalgo ha ocurrido desde la época de la Colonia y continúa hasta nuestros días, con énfasis hacia la extracción de minerales metálicos. A escala nacional, el aporte en la producción de metales de interés económico del estado de Hidalgo consiste en 325 toneladas de plomo, 317 toneladas de cobre y 1,758 toneladas de zinc (INEGI, 2023).

En particular, el distrito minero de Zimapán, ubicado entre las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico Mexicano y Sierra Madre Oriental es un productor importante de plomo, zinc y cobre (SGM, 2021). La notable presencia del capital minero en este distrito ha beneficiado e impulsado numerosos sectores de la región hidalguense, desde lo económico hasta lo social, incluyendo la vinculación estrecha entre empresas de capital local, la generación de fuentes de empleo y favorecer el sector terciario (Flores Hernández y Sánchez-Salazar, 2019). Dada la importancia de la actividad minera en este distrito es que actualmente se realizan esfuerzos en la investigación de la aplicabilidad de la biolixiviación sobre un concentrado de plomo utilizando cepas de bacterias autóctonas (Dezha *et al.*, 2023).

Al menos cuatro empresas mineras están activas en el distrito de Zimapán y cada una de ellas cuenta con su respectiva planta de beneficio. En particular, las minas El Monte y El Carrizal están reguladas por la Compañía Carrizal Mining, S.A de C.V., con una de las plantas de beneficio instalada con mayor capacidad en la región (alrededor de unas 2,500 toneladas/día). Esta empresa explota exclusivamente minerales metálicos asociados a sulfuros y sulfosales, tales como zinc, cobre, plomo y plata, mediante flotación selectiva (Flores Hernández y Sánchez-Salazar, 2019; SGM, 2021).

La lixiviación es un proceso químico que tiene la finalidad de extraer uno o varios elementos solubles a partir de una matriz sólida (materia mineral), mediante la aplicación de solventes de origen orgánico e inorgánico y, en particular, los solventes inorgánicos suelen ser altamente nocivos para el ambiente, como el cianuro y el ácido sulfúrico. Es por lo que se han diseñado técnicas alternativas que minimicen el impacto ambiental, como es el caso de la biolixiviación (Eyzaguirre-Liendo y Castillo-Cotorina, 2019).



Trituración de materia mineral para lixiviación.
Fotografía: Anette Dezha-Bomaye.

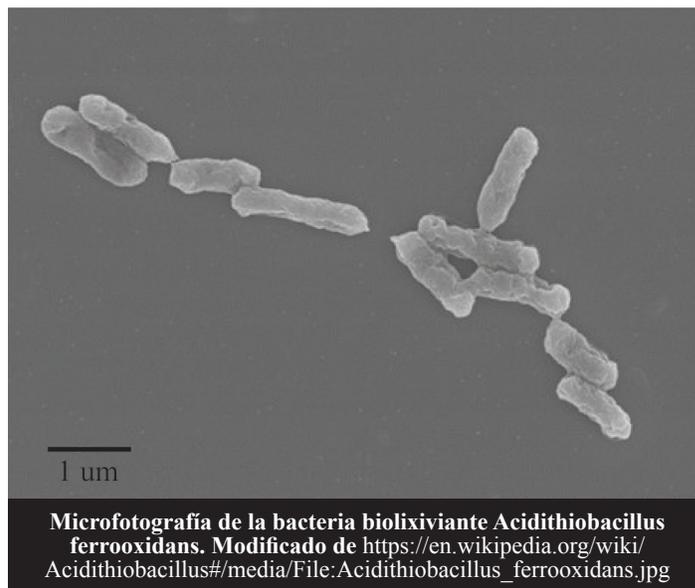
La Biolixiviación: Una estrategia sustentable

La lixiviación y biolixiviación se emplean para recuperar minerales metálicos por disolución. Sin embargo, en la lixiviación se utilizan compuestos (agentes lixiviantes y/o tensoactivos) que son dañinos al ambiente y a la salud, tal es el caso del cianuro para la obtención de oro y plata (Salinas *et al.*, 2004). Algunos de estos agentes lixiviantes (por ejemplo, ácido sulfúrico, ácido nítrico y ácido clorhídrico) al estar en contacto con los minerales, generan drenajes ácidos, que en caso de derrames afectan severamente al suelo, agua superficial y subterránea, así como a todos los organismos presentes. En el caso de la biolixiviación ácida, los químicos se adicionan en menor volumen y concentración, ya que el metabolismo bacteriano asegura un aporte del ion férrico (Fe^{3+}), dando como resultado una menor producción de drenajes ácidos, lo cual disminuye considerablemente riesgos potenciales al ambiente (Bernardelli *et al.*, 2017) y, por lo tanto, representa una estrategia sustentable.

La acción de bacterias para la extracción de metales

La biolixiviación es un proceso mediante el cual se facilita la extracción de metales por acción de microorganismos, tales como hongos, arqueas o bacterias. Los estudios llevados a cabo sobre la aplicación de bacterias como agentes biolixiviantes marcan la pauta del cumplimiento del objetivo principal de la lixiviación tradicional, el cual consiste en la recuperación de minerales metálicos en solución (Huarachi-Olivera *et al.*, 2017). Se trata de una alternativa amigable con el ambiente, generadora de utilidades económicas significativas y con un alto potencial de aplicación en la industria minera. Para una adecuada implementación de la biolixiviación como proceso de beneficio de minerales, se deben considerar varios factores, incluyendo la composición mineralógica y química del mineral, tamaño y densidad de la pulpa (concentración), así como la biomasa microbiana a utilizar (Castillo-Cotrina *et al.*, 2021).

La mayoría de las bacterias y arqueas empleadas para extraer los metales presentes en los minerales (por ejemplo, oro, plata, cobre), son capaces de crecer a diferentes temperaturas, así como en ambientes ácidos, aerobios y/o anaerobios. Adicionalmente, deben tolerar altas concentraciones de compuestos tóxicos como el arsénico o el plomo. Las bacterias que más se emplean en la biolixiviación son aerobias y quimiolitótrofas, es decir, obtienen su energía a partir de la oxidación de sustancias inorgánicas (hierro y azufre). Particularmente, *Acidithiobacillus ferrooxidans* ha sido una de las bacterias de mayor interés en algunas investigaciones, debido a su capacidad de adaptación para la posible recuperación de diversos minerales a partir de la arsenopirita (FeAsS), calcopirita (CuFeS_2), esfalerita (ZnS) y la galena (PbS) (Mejía-Restrepo *et al.*, 2011). Dada la vasta diversidad de bacterias es que se sigue estudiando la capacidad biolixivante de otras especies, como es el caso de *Citrobacter* sp., para la recuperación de plomo a partir de galena (Chaerun-Siti *et al.*, 2020).



Se conocen tres mecanismos biolixivantes para solubilizar o liberar los elementos metálicos de interés (Crundwell, 2003; Watling, 2006), los cuales se describen de manera general en los siguientes párrafos:

- 1) En una mezcla de bacterias + sulfato ferroso (Fe^{2+}), los microorganismos oxidan el Fe^{2+} a sulfato férrico (Fe^{3+}), siendo éste el que actúa sobre el mineral sulfurado oxidándolo, lo que permite solubilizar al metal de interés para ser extraído posteriormente.
- 2) Las bacterias se adhieren al mineral por sustancias exopoliméricas (biopelícula), que ellas mismas producen. Esto permite que los iones férricos queden atrapados en la biopelícula, aumentando la oxidación sobre el mineral.
- 3) Las bacterias forman una biopelícula sobre el mineral y lo oxidan directamente (metabolismo celular) sin requerir de iones férricos o ferrosos. Diversos investigadores han propuesto este mecanismo, donde ocurriría una transferencia directa de electrones desde el mineral sulfurado a los compuestos de la superficie celular. Este mecanismo aún no ha sido confirmado ni descartado (Archana *et al.*, 2020; Vera *et al.*, 2022).



Comentario final

La explotación de los recursos minerales es una vía de desarrollo de la cual resulta difícil deslindarse debido a los beneficios que se obtienen. En particular, la extracción de metales por lixiviación usando agentes químicos dañinos para el ambiente es una de las prácticas ampliamente utilizadas para tal efecto. Es por esto que, la aplicación de metodologías alternativas sustentables que minimicen el impacto ambiental de tal actividad es recomendable y, por lo tanto, la biolixiviación por acción de bacterias representa una estrategia pertinente y amigable con el ambiente. 

Referencias

- Archana, P., Lala, B. S., Debabrata, P. y Krishna S.D.P. (2020). Microbial mechanism of metal sulfide dissolution. *Materials Today: Proceedings*, 30 (2), 326-331. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.615>.
- Azamar-Alonso, A. y Téllez-Ramírez, I. (2022). Introducción. En A. Azamar-Alonso, A. e I. Téllez-Ramírez (Coords.), *Minería en México: panorama social, ambiental y económico* (pp. 13-24). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Universidad Autónoma Metropolitana.
- Bernardelli, C., Plaza-Cazón, J., Uribeta, M. S. y Donati, R. E. (2017). Biominería: los microorganismos en la extracción y remediación de metales. *Industria & Química*, 368, 47-56.
- Bravo-Cuevas, V. M., González-Rodríguez, K. A., Cabral-Perdomo, M. Á., Cuevas-Cardona, C. y Pulido-Silva, M. T. (2021). Geodiversity and its implications in the conservation of biodiversity: Some case studies in central Mexico. *CIENCIA ergo-sum*, 28 (3), 1-14. <https://doi.org/10.30878/ces.v28n3a8>
- CAMIMEX (2020). *Importancia de la Minería en México*. México: La Cámara Minera de México.
- Castillo-Cotrina, D., Castellanos-Cabrera, R. y Tirado-Rebaza, E. (2021) Acción bioxidativa de cultivos microbianos biolixivantes sobre la arsenopirita. *Ciencia & Desarrollo*, 20 (1), 57-69. doi: <https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1108>
- Chaerun-Siti, K., Putri-Edina, A. y Mubarak-Mohammad, Z. (2020). Bioleaching of Indonesian Galena Concentrate with an iron and sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium at room temperature. *Frontiers in Microbiology*, 11. doi:10.3389/fmicb.2020.557548
- Crundwell, F. K. (2003). How do bacteria interact with minerals? *Hydrometallurgy*, 71 (1-2), 75-81. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00175-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00175-0).
- Dezha, A., Martínez, S., Juárez, J., Reyes, M. y Aguilar, P. (2023). Biolixiviación de plata de un concentrado de plomo de la Compañía Carrizal Mining Zimapán, Hgo., Mex., empleando bacterias. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39, 56. doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.2023.39.ANCA>
- Eyzaguirre-Liendo, P. y Castillo-Cotrina, D. (2019). Biolixiviación indicativa del sulfato de cobre por crecimiento microbiano ante el drenaje minero. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21 (1), 49-56.
- Flores Hernández, B. J. y Sánchez-Salazar, M. T. (2019). La pequeña y la mediana minería metálica de Zimapán, Hidalgo, en el contexto del proyecto neoliberal: implicaciones sociales y territoriales. En *Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C. (Coeds.)*
- Abordajes teóricos, impactos externos, políticas públicas y dinámica económica en el desarrollo regional (pp. 748 – 766). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Huarachi-Olivera, R., Dueñas-Gonza, A., Yapo, U., Almanza, M., Manuel, D., Lazarte-Rivera, A., Mogrovejo-Medina, G., Taco-Cervantes, H. y Esparza, M. (2017). Biolixiviación de mineral de cuarzo por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en reactor de columna de gravedad. *Revista de Metalurgia*, 53 (2), e096. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.096>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2023) *Industria Minerometalúrgica-1980 en adelante* (en línea). <https://www.inegi.org.mx/programas/indminero/#Tabulados>
- Mejía-Restrepo, E., Ospina-Correa, J., Osorno-Bedoya, L., Márquez-Godoy, M. y Morales-Aramburo, A. (2011). Adaptación de una cepa compatible con *Acidithiobacillus ferrooxidans* sobre concentrados de calcopirita (CuFeS₂), esfalerita (ZnS) y galena (PbS). *Revista Colombiana de Biotecnología*, XIII (1), 132-143.
- Poch, S. J. y Canet, M. C. (2018) ¿Por qué un geoparque en la Comarca Minera de Hidalgo? *Guía de campo del Geoparque de la Comarca Minera*. doi: 10.32775/Bk.GuideCM.cap1.23_28.2018
- Roberto, F. F. y Schippers, A. (2022). Progress in bioleaching: part B, applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106, 5913-5928. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12085-9>
- Salinas, E., Rivera, I., Carrillo, F. R., Patiño, F., Hernández, J. y Hernández, L. E. (2004). Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. *Revista de la Sociedad Química de México*, 48 (4), 315-320.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2021). *Panorama Minero del Estado de Hidalgo*. Servicio Geológico Mexicano.
- Vera, M., Schippers, A., Hedrich, S. y Sand, W. (2022). Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation-part A. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106 (21), 7375. doi: 10.1007/s00253-022-12233-1.
- Watling, H. R. (2006). The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides—A review. *Hydrometallurgy*, (84), 81-108. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.05.001>.



Proceso de lixiviación por flotación selectiva de cobre por supresión de zinc y plomo.
Fotografía: Anette Dezha-Bomaye.