



Microorganismos que extraen litio: una solución sostenible desde la biotecnología

Guadalupe Lizbeth Daniel-Gonzalez¹, Carlos Ahuatzi-Reyes¹, Ovier Cabrera-Paredes², José Luis Torres García¹, Francisco José Fernandez-Perrino³, Diana Verónica Cortés Espinosa^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac- Tepetitla, km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, C.P. 90700, México.

²Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Agrobiología, Av. Ribereña S/N, Centro, Tlaxcala C.P. 90000, Tlaxcala, México.

³Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I), Depto. de Biotecnología, C.P 09340, Iztapalapa, México

Autores de correspondencia: *dcortes@ipn.mx

RESUMEN

El litio es un elemento con múltiples aplicaciones industriales, entre las que destacan su uso en baterías recargables, cerámica y vidrio. En la naturaleza se encuentra en rocas y salmueras y su extracción mediante métodos convencionales implica procesos que generan un impacto considerable en el ambiente. La biominería, en particular la biolixiviación, representa una alternativa sostenible para su recuperación, utilizando microorganismos como bacterias, hongos y levaduras. México cuenta con reservas considerables de litio en varios estados, lo que representa una oportunidad estratégica para su desarrollo industrial y económico. Sin embargo, su explotación enfrenta desafíos tecnológicos y ambientales. El uso de microorganismos halotolerantes en la biolixiviación representa un enfoque innovador y sostenible para mejorar la recuperación de litio con un menor impacto ambiental.

Palabras clave: Litio, Biolixiviación, Biominería, Halotolerantes, México.



ABSTRACT

Lithium, an element with multiple industrial applications, is particularly important in the production of rechargeable batteries, ceramics, and glass. In its nature state, it is found in rocks and brines. Conventional extraction processes have a considerable impact on the environment. Bio-mining, particularly bioleaching, is a sustainable alternative for its recovery, making use of microorganisms such as bacteria, fungi, and yeasts. Mexico boasts considerable lithium reserves, dispersed across multiple states, which present a strategic opportunity for its industrial and economic advancement. However, the sustainable exploitation of this natural resource is confronted with significant technological and environmental challenges. The use of halotolerant microorganisms in bioleaching represents an innovative and sustainable approach to enhancing lithium recovery, thereby reducing environmental impact.

Keywords: Lithium, Bioleaching, Biomining, Halotolerant microorganisms, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El litio, conocido como "oro blanco", es un metal alcalino esencial en la fabricación de baterías recargables, desempeñando un papel clave en la transición hacia energías más sostenibles (Fornillo et al. 2024). Su demanda ha aumentado significativamente, impulsada por la expansión de la electromovilidad y la necesidad de almacenamiento de energía renovable (Moazzam et al. 2021) México posee importantes reservas de litio, especialmente en Sonora, lo que representa una oportunidad para su explotación y desarrollo industrial (Quemada et al. 2024). Sin embargo, la extracción convencional de li-

tio presenta desafíos ambientales, como el alto consumo de agua y la generación de residuos tóxicos (Ströbele-Gregor 2012). En este contexto, la biominería, y en particular la biolixiviación, emerge como una alternativa sostenible. Este enfoque utiliza microorganismos para movilizar el litio presente en los minerales, reduciendo así los impactos ambientales asociados con las técnicas tradicionales. México enfrenta el desafío de desarrollar tecnologías innovadoras y sostenibles para la extracción de este recurso estratégico (Chen et al. 2022)

¿QUÉ ES EL LITIO?

El litio es un elemento que genera numerosas dudas respecto a su impacto. En la naturaleza, solo se encuentra en combinación con diversas rocas o disuelto en agua (Azamar y Téllez 2022). En la naturaleza se encuentra en forma de mineral (espodumena) y se extrae principalmente de pegmatitas de litio-cesio-tantalio (Fig. 1). La teoría clásica sugiere que las pegmatitas surgen de la cristalización extrema de granito o de la fusión parcial de rocas metamórficas (Koopmans et al. 2024).

Esta particularidad le otorgó su nombre, derivado del término griego "*Lithos*", el cual significa "piedra". De acuerdo con la historia de su descubrimiento se sabe que fue descubierto por primera vez en el mineral de Petalita en 1817, por el químico de origen sueco Johan August Arfwedson.



Figura 1. Espodumena de pegmatita.

3

PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL LITIO

El litio es un elemento químico de gran importancia debido a sus múltiples aplicaciones en la industria y la tecnología. Pertenece al grupo de los denominados “metales alcalinos”, y en la tabla periódica es representado con el símbolo químico “Li” y el número atómico “3”. Entre sus propiedades fisicoquímicas más importantes, se encuentran que es menos denso que el agua, es un metal blando y maleable con un punto de fusión de 180.54 °C. Además, posee alta conductividad eléctrica y térmica. Es altamente reactivo y su bajo potencial electroquímico lo hace ideal para baterías recargables, como se puede observar en la Tabla 1 (Brown et al. 2016; Goodenough y Park 2013).

Característica	Valor
Símbolo	Li
Número atómico	3
Masa atómica	6.94 u
Densidad	0.534 g/cm ³
Punto de fusión	180.54 °C
Punto de ebullición	1342 °C
Conductividad eléctrica	1.08 x 10 S/m
Potencial electroquímico	-3.07 V
Estado a temperatura ambiente	Sólido
Color	Plateado/Blanco metálico
textura	Blando y ligero
Grupo	Metales alcalinos (I)
Reactividad	Alta

Tabla 1. Principales características del litio.

4

USOS DEL LITIO

El litio posee una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores industriales y tecnológicos, desde la fabricación de vidrios y esmaltes cerámicos hasta la producción de aluminio y la creación de absorbentes de dióxido de carbono para la industria espacial y submarina. Sin embargo, su uso más destacado es en la fabricación de baterías para dispositivos electrónicos portátiles como teléfonos móviles, relojes inteligentes y computadoras portátiles. Además, la creciente demanda de vehículos eléctricos ha impulsado aún más la importancia del litio en los últimos años (Figura 2) (Quintero et al. 2021).

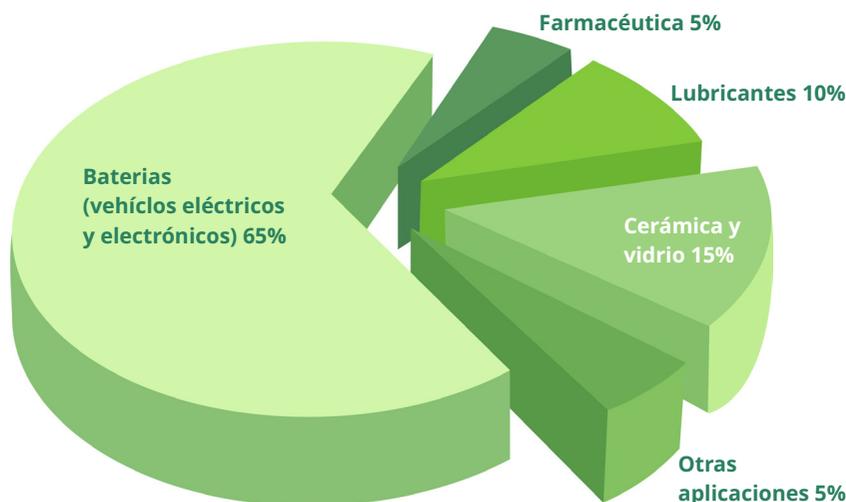


Figura 2. Distribución mundial del litio por sector.

5

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LITIO

Según datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) del año 2016, las reservas anuales de minerales de litio se estimaron en aproximadamente 14 millones de toneladas. Estas reservas se encuentran distribuidas en los cinco continentes: América del Norte, América del Sur, África, Asia y Australia, tal y como se muestra en la Figura 3 (Jaskula 2017).

La producción comercial de litio se concentra principalmente en Chile, Australia y Argentina. Estos tres países son líderes en la extracción de este crucial elemento. En cuanto a las reservas mundiales de litio, Chile y China destacan como los principales poseedores, con un 51.8% y un 22.1% respectivamente. Les siguen Argentina (13.8%), Australia (11.1%), Portugal (0.4%) y Brasil (0.3%) (Jaskula 2017; Swain 2017).

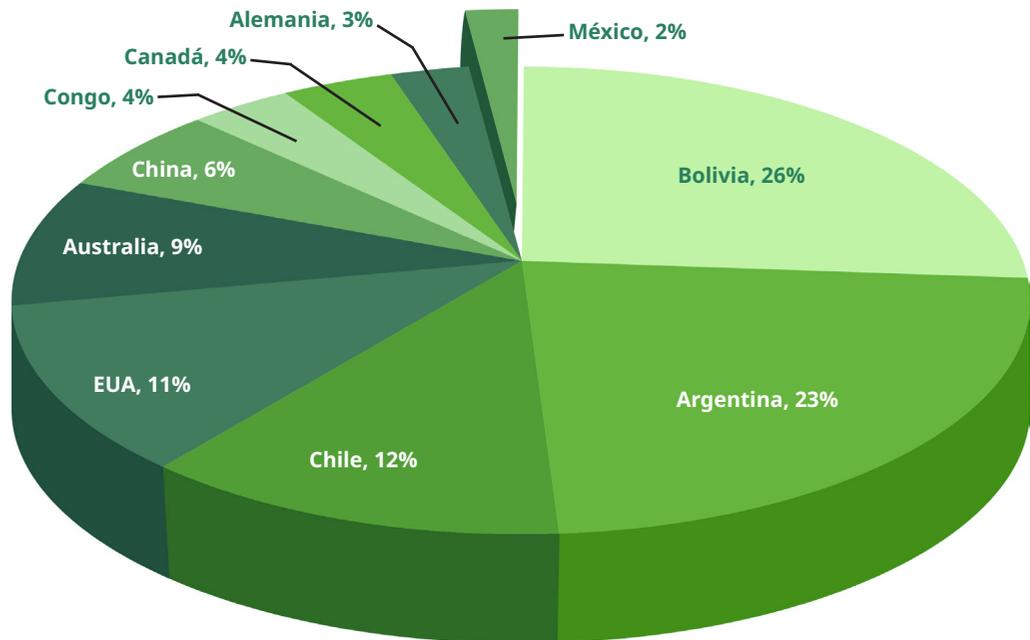


Figura 3. Reservas de litio en el mundo, 2023.

5.1 México ante el litio

México es reconocido por su riqueza en recursos minerales y estratégica posición en el mercado global de litio. Aunque hasta hace poco el litio tenía escasa trascendencia, ahora es clave para el futuro económico y energético del país (Durán 2023). El gobierno muestra un fuerte interés estratégico por explotarlo, buscando impulsar el desarrollo nacional y posicionarse en la cadena de suministro global. Con la demanda mundial en alza y el papel del litio en la transición energética, México deberá adaptar sus políticas de exploración y explotación (Toscana 2023).

5.2 Panorama sobre las reservas de litio en México

México es reconocido por su riqueza en recursos minerales y estratégica posición en el mercado global de litio. Aunque hasta hace poco el litio tenía escasa trascendencia, ahora es clave para el futuro económico y energético del país (Durán 2023). El gobierno muestra un fuerte interés estratégico por explotarlo, buscando impulsar el desarrollo nacional y posicionarse en la cadena de suministro global. Con la demanda mundial en alza y el papel del litio en la transición energética, México deberá adaptar sus políticas de exploración y explotación (Toscana 2023).

Figura 4. Ubicación de principales yacimientos de Litio en México (Modificado de Sánchez y Pérez 2023).



6

EXTRACCIÓN DE LITIO

En la naturaleza, el litio se encuentra principalmente en salmueras, pegmatitas y arcillas (Brown et al. 2016). Debido a las diferencias en su ubicación y composición, se requieren procesos de extracción y procesamiento específicos para cada una de ellas, en donde de manera general el proceso de extracción consiste en: 1.- La extracción del material a partir de diversas fuentes, 2.- Procesamiento para concentrarlo y purificar mediante procesos físicos y químicos y 3.- La precipitación de manera comercializable tal y como se muestra en la Figura 5. Estos procesos presentan desafíos ambientales y tecnológicos, como el alto consumo de energía y recursos naturales, además del lento e ineficiente proceso de extracción (Vera et al. 2023).

6.1 Extracción a partir de salmueras

Las salmueras de litio se localizan en lagos salinos y salares, destacando especialmente el “triángulo del litio” —Argentina, Bolivia y Chile— (Brown et al. 2016). El método de extracción varía según el tipo de depósito, pero generalmente sigue un proceso similar (Swain 2017).

1. Se perforan rocas porosas que contienen salmueras con litio.
2. Se bombean estas aguas hacia estanques de evaporación.
3. La evaporación, impulsada por el sol y el viento, concentra progresivamente los minerales.

6.2 Extracción a partir de pegmatitas

Las pegmatitas son rocas ígneas (formadas por la solidificación del magma) contienen minerales ricos en litio, como la espodumena (Brown et al. 2016). Su extracción incluye una serie de proce-

sos que se implementan, como el bombeo y la evaporización, precipitación y finalmente la purificación del metal de interés (Swain 2017).

6.3 Extracción a partir de arcillas

Existen minerales arcillosos, como la hectorita, que contienen concentraciones significativas de litio. Mediante el uso de ácido sulfúrico se disuelve el litio contenido en la arcilla. Los residuos sólidos son separados usando filtros, y la solución obtenida es sometida a procesos de precipitación química y cristalización.

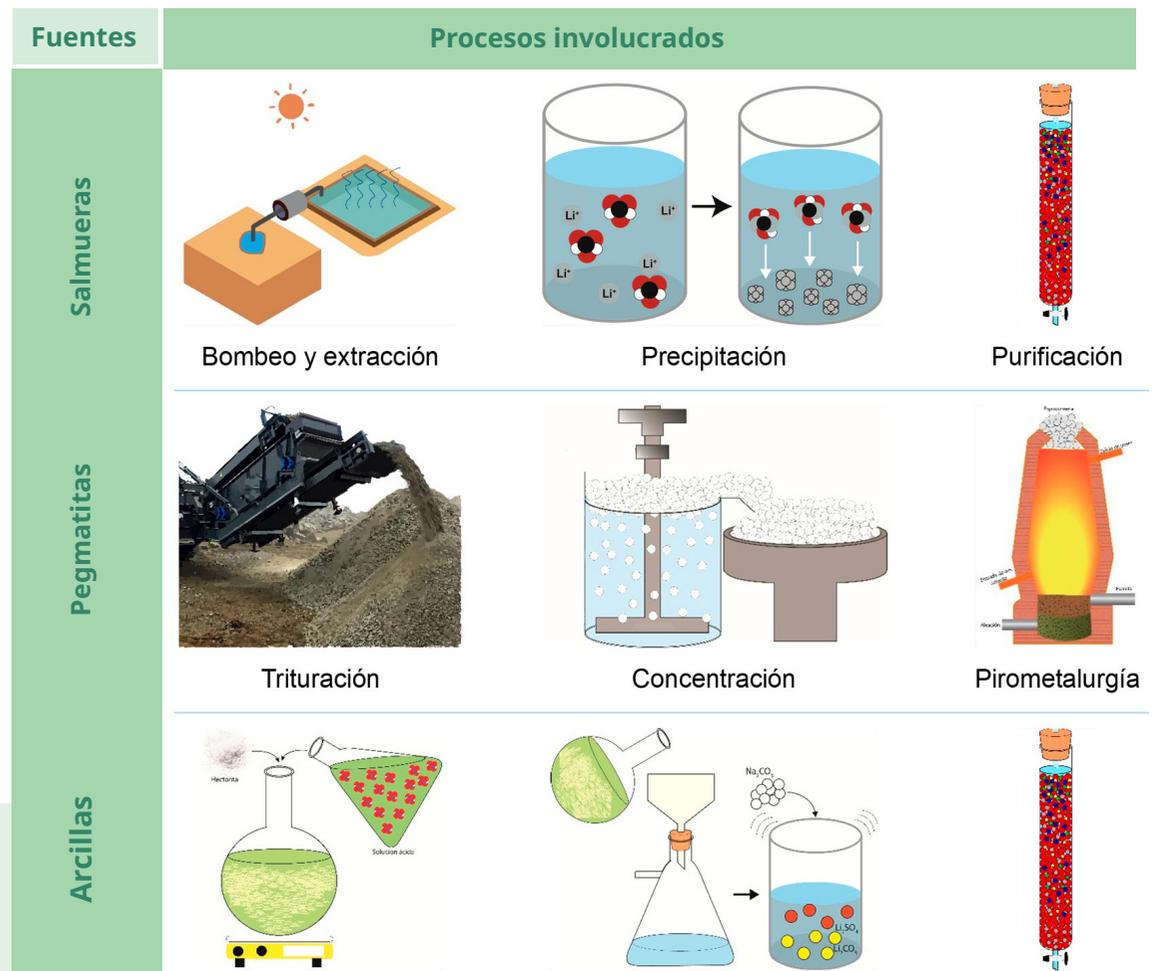


Figura 5. Procesos involucrados en la extracción de litio a partir de diversas fuentes.

6.4 Biominería

La biominería engloba procesos microbiológicos que usan microorganismos (bacterias, arqueas u hongos) para extraer metales de minerales y residuos (Bernardelli et al. 2017). Un proceso clave es la biolixiviación, donde microorganismos extremófilos oxidan y solubilizan minerales complejos para liberar metales. Estos microorganismos, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, sobreviven en condiciones extremas para extraer metales mediante biohidrometalurgia. Además, la biominería incluye técnicas complementarias como:

- **Biooxidación** de minerales refractarios para mejorar la recuperación de metales (oro, cobre).
- **Biosorción y bioprecipitación** para remediación y purificación, útiles en tratamiento de efluentes y suelos contaminados.

6.4.1 El papel de los hongos, levaduras y bacterias en la biolixiviación para la recuperación del litio.

La biolixiviación, es un proceso para recuperar metales con interés económico y también se puede utilizar para recuperar litio, a partir de baterías gastadas, se basa en la acción de diversos microorganismos (bacterias, hongos y levaduras) que utilizan diferentes estrategias biológicas para liberar los metales valiosos, permitiendo su extracción.

En el campo de la biominería, los hongos juegan un papel crucial debido a su naturaleza heterótrofa y su habilidad para generar ácidos orgánicos y otros metabolitos que facilitan la disolución de metales (Sanny et al. 2022). Especies fúngicas como *Aspergillus niger* y varias especies de *Penicillium* (incluyendo *P. chrysogenum* y *P. simplicissimum*) han sido identificados como particularmente útiles en la biolixiviación de litio (Lobos et al. 2021). Las levaduras, organismos microscópicos que se alimentan de materia orgánica, también juegan un papel en la biohidrometalurgia. Esto se debe a que producen ácidos y sustancias similares a polímeros, conocidas como exopolisacáridos (EPS), que ayudan a disolver metales y a descomponer minerales (Jaiswal y Srivastava 2024). Las bacterias desempeñan un papel multifacético en la biohidrometalurgia, con un enfoque particular en la extracción de litio. Las bacterias acidófilas quimiolitotróficas, como las especies de *Acidithiobacillus*, son cruciales debido a su capacidad para oxidar el hierro y/o el azufre (Jones et al. 2023).



6.4 .2 Mecanismos de biolixiviación por microorganismos

Diferentes referencias describen en específico dos mecanismos básicos de biolixiviación,

- Mecanismo directo / de contacto
- Mecanismo indirecto / sin contacto

En el proceso de contacto directo los microorganismos se adhieren al mineral y oxidan directamente los elementos a través de una matriz de EPS donde ocurren las reacciones. Este mecanismo existe, pero es raro.

La biolixiviación indirecta es el método más común: los microbios liberan iones férricos o ácido sulfúrico que disuelven minerales sin contacto directo, permitiéndoles extraer los metales deseados. Con respecto a la biosorción, los péptidos en la superficie celular se enlazan con alta afinidad a iones metálicos específicos, eliminándolos desde soluciones acuosas.

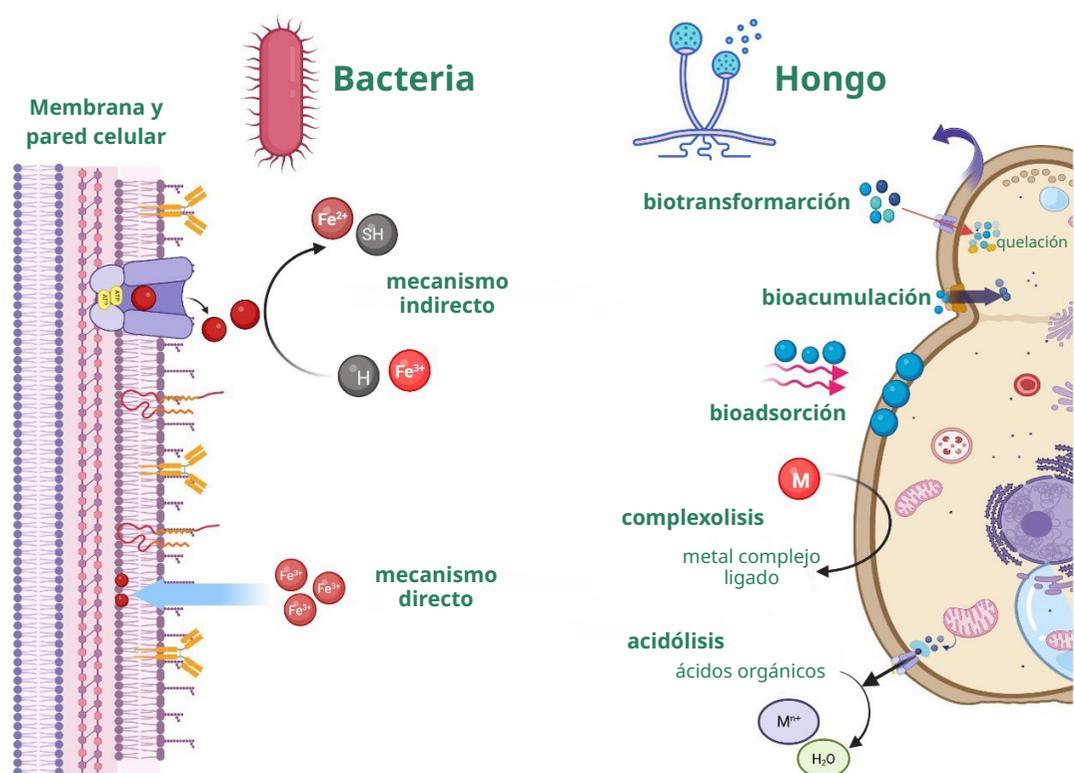
En la bioacumulación los contaminantes se acumulan dentro del organismo. El Índice de Bioacumulación (IBA) cuantifica este proceso

comparando la concentración del metal en el organismo vs en el medio.

Diversos microorganismos, que abarcan tanto bacterias como hongos, exhiben mecanismos específicos para la bioextracción de metales. Estos mecanismos se conocen como redoxólisis, acidólisis y complexólisis y/o quelación (Jaiswal y Srivastava 2024).

- Redoxólisis: los microbios cambian el estado de oxidación del metal (oxidando o reduciendo), lo que facilita su solubilización. Puede actuar directa o indirectamente.
- Acidólisis: bacterias u hongos producen ácidos (orgánicos o inorgánicos) que disuelven metales como plomo, cobre, níquel y zinc.
- Complexólisis / Quelación: metabolitos microbianos (como sideróforos, cianuros o ácidos) forman complejos solubles con metales preciosos (oro, platino, paladio), facilitan su separación y recuperación.

Figura 6. Mecanismo de biolixiviación: A) Mecanismo directo e indirecto en membrana bacteriana, B) Mecanismo metabólico en célula fúngica.



7 RECUPERACIÓN DE LITIO

Los principales métodos para recuperar metales hoy son la pirometalurgia y la hidrometalurgia (Xin et al. 2009). La pirometalurgia utiliza temperaturas muy altas (500–1 000 °C) para fundir minerales o residuos electrónicos, siendo eficaz para metales como cobre, plomo y zinc, pero poco útil para el litio, que pasa a formar escoria por su baja fusión y alta reactividad (Biswal y Balasubramanian 2023). El proceso incluye trituration, tostación o fusión, seguido de refinación posterior. Las principales ventajas y desventajas de este método se mencionan a continuación:

Ventajas:

- Procesa grandes volúmenes rápidamente.
- Relativamente sencillo, sin necesidad de molienda en algunos casos

Desventajas:

- Alto consumo energético y elevados costos.
- Emisión de gases contaminantes (CO₂, SO₂).
- Genera residuos sólidos y pierde el litio en la escoria

La hidrometalurgia implica disolver metales usando soluciones acuosas (ácidas, alcalinas o reductoras), seguido de purificación (adsorción, filtración, extracción por solventes, electrodeposición o precipitación). Entre las ventajas y desventajas de este método destacan:

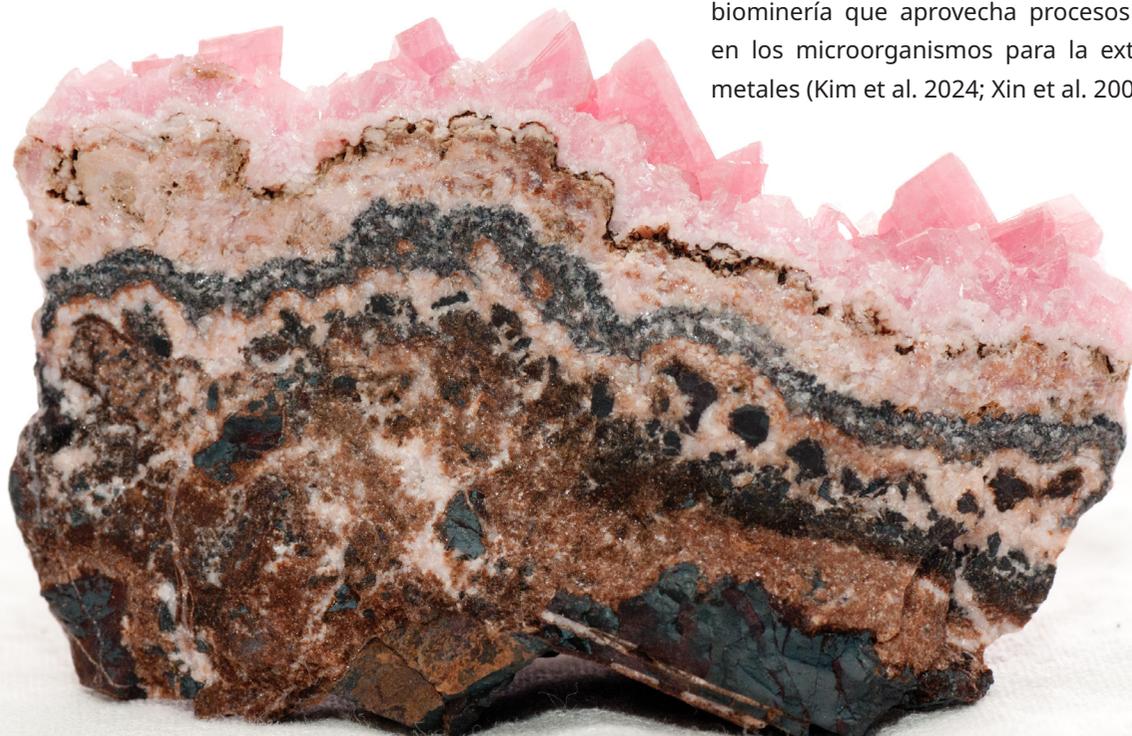
Ventajas:

- Menor consumo energético.
- Alta selectividad y pureza del metal extraído.
- Menores emisiones gaseosas.

Desventajas:

- Genera residuos líquidos contaminantes y requiere tratamiento.
- Reactivos costosos y exige control preciso de condiciones.

Dadas las limitaciones que estos métodos presentan en aspectos como la generación de residuos, el consumo energético y los costos de operación y mantenimiento, se hecho necesario el desarrollo de métodos más limpios, económicos y sostenibles para la obtención de litio; uno de ellos es la biolixiviación, que es una forma de biominería que aprovecha procesos biológicos en los microorganismos para la extracción de metales (Kim et al. 2024; Xin et al. 2009).



8

CONCLUSIONES

El litio es esencial para la fabricación de baterías y aplicaciones industriales, lo que ha incrementado su demanda global. Aunque es relativamente abundante en la corteza terrestre, su extracción presenta desafíos ambientales y tecnológicos. Las técnicas convencionales de obtención de litio a partir de salmueras, pegmatitas y arcillas requieren grandes volúmenes de agua y generan residuos potencialmente contaminantes. En este contexto, la biominería, y en particular la biolixiviación, emerge como una alternativa sostenible para la recuperación de litio, aprovechando la capacidad de ciertos microorganismos para solubilizar metales sin procesos altamente contaminantes.

México posee reservas significativas de litio, principalmente en arcillas, lo que representa una oportunidad para su explotación y desarrollo industrial. Sin embargo, la extracción de litio a partir de estos depósitos sigue siendo un desafío técnico y económico. La implementación de procesos biotecnológicos, como la biolixiviación con microorganismos halotolerantes, podría ofrecer una solución viable y ambientalmente amigable para mejorar la recuperación del metal.

Finalmente, el futuro de la industria del litio dependerá de la optimización de tecnologías sostenibles que permitan su extracción eficiente con el menor impacto ambiental posible, asegurando su disponibilidad para el avance de la transición energética global.

9

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por las becas No. 1238884 y No. 2048270, y a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) por el apoyo brindado al proyecto 4222c24.



REFERENCIAS

- Azamar A (2022) El litio en México: verdades y mentiras. In Minería en México, panorama social, ambiental y económico. Editado por: A Azamar and I Tellez. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, Miguel Hidalgo, CDMX. 27—46 pp.
- Bernardelli C, Plaza JC, Urbieta MS, Donati ER (2017) Biominería: los microorganismos en la extracción y remediación de metales. *Industria & Química* 368:47—56.
- Biswal BK, Balasubramanian R (2023) Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using microbial agents for bioleaching: a review. *Frontiers in Microbiology* 14:1—22.
- Brown T, Walters A, Idoine N, Gunn G, Shaw R, Rayner D (2016) Lithium profile. *British Geological Survey* [online]. Available from https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534440/1/lithium_profile.pdf [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Chen, J., Liu, Y., Diep, P., & Mahadevan, R (2022) Harnessing synthetic biology for sustainable biomining with Fe/S-oxidizing microbes. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.
- Durán D (2023) Por qué es tan importante la explotación del litio en México [online]. Available from <https://www.infobae.com/mexico/2023/03/27/por-que-es-tan-importante-la-explotacion-del-litio-en-mexico/> [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Farías R, Norambuena R, Ferrer A, Camejo P, Zapata C, Chávez R, Orellana O, Levicán G (2021) Redox stress response and UV tolerance in the acidophilic iron-oxidizing bacteria *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Research in Microbiology* 172(3):1—10.
- Fornillo B, Argento, M, Gatto, E (2024) La ideología en torno a la extracción del litio. *Movilidad, expulsión y fin*. *Quid 16: Revista del Área de Estudios Urbanos* (22):1—20.
- Goodenough JB, Park KS (2013) The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society* 135(4):1167—1176.
- Jaiswal M, Srivastava S (2024) A review on sustainable approach of bioleaching of precious metals from electronic wastes. *Journal of hazardous materials advances* 14:1—8.
- Jaskula, BW (2017) Lithium. In *Mineral commodity summaries 2017*. Edited by S Jewell and SM Kimball. U.S. geological survey. Reston, Virg. 100—101 pp.
- Jones S, Santini JM (2023) Mechanisms of bioleaching: iron and sulfur oxidation by acidophilic microorganisms. *Essays biochem* 67(4): 685—699.
- Kim J, Nwe HH, Yoon CS (2024) Enhanced bioleaching of spent Li-ion batteries using *A. ferrooxidans* by application of external magnetic field. *Journal of Environmental Management* 367: 1—7.
- Koopmans L, Martins T, Linnen R, Gardiner NJ, Breasley CM, Palin RM, Groat LA, Silva D, Robb LJ (2024) The formation of lithium-rich pegmatites through multi-stage melting. *Geology* 52: 7—11.
- Lobos A, Harwood VJ, Scott KM, Cunningham JA (2021) Tolerance of three fungal species to lithium and cobalt: Implications for bioleaching of spent rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Applied Microbiology* 131(2): 743—755.
- Moazzam P, Boroumand Y, Rabiei P, Baghbaderani SS, Mokarian P, Mohagheghian F, Mohammed LJ, Razmjou A (2021) Lithium bioleaching: an emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries. *Chemosphere* 277:2—17.
- Quemada Villagómez ML, Quemada-Villagómez, LI., Jiménez Islas, H., & Flores Mar NL (2024) Perspectivas estratégicas del Litio en México: Potencial económico y desafíos industriales *Edu.Mx*. Available from <https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes11no2vol1/08%20-60-67.pdf> [fecha de revisión 16 Julio 2025].
- Quintero V, Che O, Ching E, Auciello O, Obaldía E (2021) Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones. *Revista de I+D Tecnológico* 17:1—9.
- Sánchez RA, Pérez R (2023) El litio de México [online]. *Avance y perspectiva* 10(4). Available from <https://avancey perspectiva.cinvestav.mx/el-litio-de-Mexico/> [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Sanny Z, Kucmanova A, Gerulová K (2022) Bioleaching of lithium-ion battery-review. *En seminario internacional de Doctorado 2022* 291 pp.
- Ströbele-Gregor J (2012) Litio en Bolivia: el plan gubernamental de producción e industrialización del litio, escenarios de conflictos sociales y ecológicos, y dimensiones de desigualdad social [online]. *desiguALdades.net Working Paper Series* 14. Available from https://www.bivica.org/files/bolivia_plan-litio.pdf [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Swain B (2017) Recovery and recycling of lithium: a review. *Separation and Purification Technology* 172: 388—403.
- Toscana-Aparicio A (2023) La batalla por el litio de México. *Investigaciones Geográficas* 112:1—2
- Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023) Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 149—165.
- Xin B, Zhang D, Zhang X, Xia Y, Wu F, Chen S, Li L (2009) Bioleaching mechanism of Co and Li from spent lithium-ion battery by the mixed culture of acidophilic sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria. *Bioresource Technology* 100(24): 6163—6169.

