

PRODUCCIÓN DE LITIO DESDE EL ESPODUMENO: ENFOQUE EN EFICIENCIA HÍDRICA Y ENERGÉTICA



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460 Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Producción de litio desde el espodumeno: enfoque en eficiencia hídrica y energética. Jhon Chique Acero, Leopoldo Gutiérrez, Yannay Casas y Darssy Carpio. Abril 2024.

Agradecimientos:

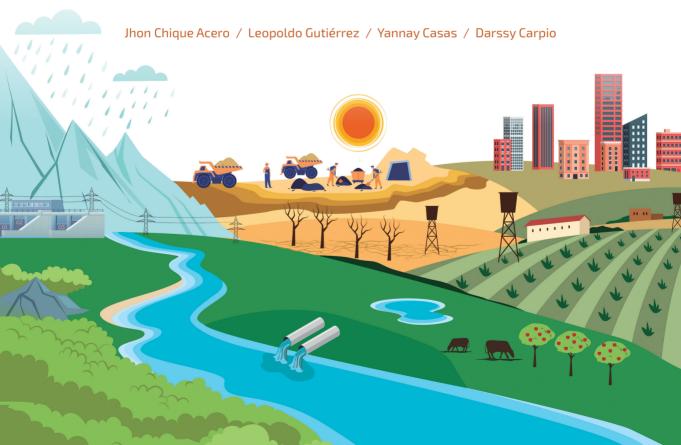
Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) ANID/FONDAP/15130015 ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario, Concepción, Chile Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



PRODUCCIÓN DE LITIO DESDE EL ESPODUMENO: ENFOQUE EN EFICIENCIA HÍDRICA Y ENERGÉTICA



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Jhon Chique Acero
Ingeniero Metalúrgico.
Magíster en Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Estudiante de Doctor en Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.



Leopoldo Gutiérrez
Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor of Philosophy in Mineral Processing,
University of British Columbia, Canadá.
Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería
Metalúrgica, Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



Yannay Casas
Ingeniera Química.
Doctora en Applied Biological Science,
Ghent University, Bélgica.
Máster en Análisis de Procesos de la Industria Química,
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
Profesora Asociada del Departamento de Ingeniería
Ambiental, Universidad de Concepción.
Investigadora Asociada CRHIAM.



Darssy Carpio
Ingeniera Metalurgista.
Doctorado en Ingeniería de Procesos,
Universidad Nacional de San Agustín,
Arequipa, Perú.
Docente Principal Escuela Profesional de
Ingeniería Metalúrgica,
Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
Docente RENACYT- Activa.

RESUMEN

En Chile, un país reconocido por su producción de litio, la extracción de este elemento se realiza a partir de salares, los que contienen altas concentraciones de este mineral en forma de salmueras. Para obtenerlo, se lleva a cabo un proceso de evaporación de las salmueras, seguido de la extracción y purificación del litio. Esta serie comunicacional ofrece una visión general de los procesos de producción de litio, tanto desde el mineral, como desde los salares. Además, analiza el consumo hídrico y energético asociado con cada uno de estos métodos.

El litio es un elemento crucial en la industria de baterías y energía renovable, y su demanda está en constante crecimiento. Sin embargo, su obtención a partir de rocas, como el espodumeno, a través del proceso de flotación, conlleva un considerable consumo de agua y energía.

6

INTRODUCCIÓN

El litio es un metal con propiedades altamente valoradas en el presente, destacando una elevada conductividad eléctrica, baja viscosidad, muy liviano y bajo coeficiente de expansión térmica (Tabla 1). Estas cualidades favorecen que tenga múltiples aplicaciones en el sector industrial (vidrio, cerámicas, polímeros entre otros) y especialmente en el ámbito de las baterías para almacenamiento energético, dada la tendencia tecnológica actual.

Chile se destaca como uno de los principales productores de litio a nivel mundial. El país cuenta con el Salar de Atacama, el mayor depósito de litio en forma acuífera a nivel global. En este salar, se encuentran dos grandes operaciones: el Salar del Carmen, operado por SQM, y La Negra, operado por Albemarle. Estas operaciones tienen previsto duplicar su producción conjunta a partir de 2025, alcanzando unas 100 mil toneladas de carbonato de litio equivalente en 2019 (El País S. L, 2023).

Además del Salar de Atacama, se estudia la posibilidad de explotar litio en el Salar de Maricunga. Codelco y Minera Salar Blanco están evaluando esta opción en conjunto. Codelco, junto con Simco y Salar Blanco, tiene grandes pertenencias en el Salar de Maricunga.

Codelco ha llegado a acuerdos con SQM para una asociación público-privada que permitirá a la empresa pública tener participación en las utilidades y la producción de litio a partir de 2031. Asimismo, se ha destacado un acuerdo entre ambas empresas para explotar en conjunto el Salar de Atacama hasta 2060, lo que representa un hito en la industria minera chilena. Codelco ha llevado a cabo trabajos de exploración en el Salar de Maricunga, obteniendo resultados prometedores. Esto podría significar un futuro próspero en la extracción de litio en esa zona (El País S. L, 2023).

7

EL LITIO Y SUS FUENTES DE OBTENCIÓN

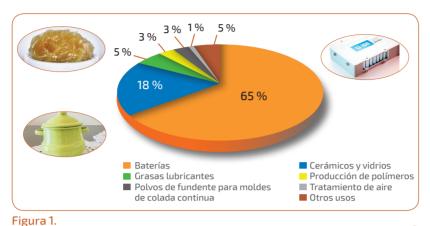
A nivel mundial, los principales países productores de litio son Australia, Chile, China y Argentina. Australia encabeza la producción global de litio con alrededor de 55,300 toneladas obtenidas a partir de minerales, principalmente espodumeno y petalita. Chile le sigue como el segundo mayor productor con 28,300 toneladas extraídas de salmueras. China se ubica en tercer lugar con una producción de 14,000 toneladas procedentes de minerales como el espodumeno y la lepidolita, mientras que Argentina produce alrededor de 5,970 toneladas a partir de salmueras (Álvarez, 2023; Statista, 2023).

Es importante destacar que Chile posee las mayores reservas de litio en salares, lo que le confiere una ventaja competitiva significativa en la industria del litio a nivel global.

Tabla 1.
Propiedades fisicoquímicas del litio. Fuente: Lenntech company.

Número atómico	3
Masa atómica / g mol ⁻¹	6,94
Densidad / g cm ⁻³	0,53
Calor específico / J g ^{-1°C-1}	3,58
Punto de fusión / °C	180,50

En la Figura 1 se observa el consumo de litio en diversas industrias como en la de aluminio, del vidrio y cerámica, grasas lubricantes, sistemas de aire acondicionado y control de humedad, etc. Sin embargo, la necesidad de reducir el uso de combustibles fósiles en los sistemas de transporte (que producen aproximadamente el 23% del $\mathrm{CO_2}$ emitido a nivel mundial) ha impulsado el desarrollo de baterías de litio que permiten energizar los vehículos eléctricos e híbridos (Valenzuela & Andrea, 2015).



Distribución de consumo de litio. Fuente: U.S. Geological Survey, (2019).

Según la Figura 2, las principales fuentes de litio son las salmueras en reservorios acuíferos (salares y lagunas continentales) con un 60%, pegmatitas (espodumeno, petalitas, lepidolitas, amblogonita y eucriptita, mica) con un 27%, rocas sedimentarias (arcillas, toba volcánica, rocas evaporitas lacustres) un 7%, salmueras en depósitos geotermales (acuíferos formados por la circulación de agua caliente a partir de fracturas terrestres) un 3% y zeolitas (capas de jadarita, mineral de silicato de la familia de las zeolitas) un 3%.

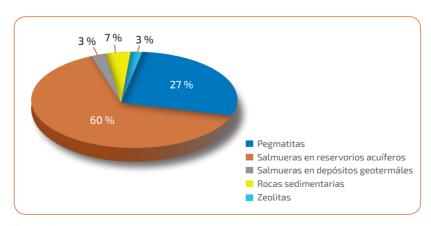


Figura 2.

Fuentes de litio. Fuente: Elaborado a partir de Cochilco, (2018).

Existen dos tipos de depósitos que son la fuente de la explotación actual del litio. Estos son las pegmatitas (mineral) y los salares (Tabla 2). Los depósitos de salmueras son los más abundantes. Sin embargo, los yacimientos pegmatíticos, están más ampliamente distribuidos a nivel mundial (Andrés S. & Cantallopts J., 2020).

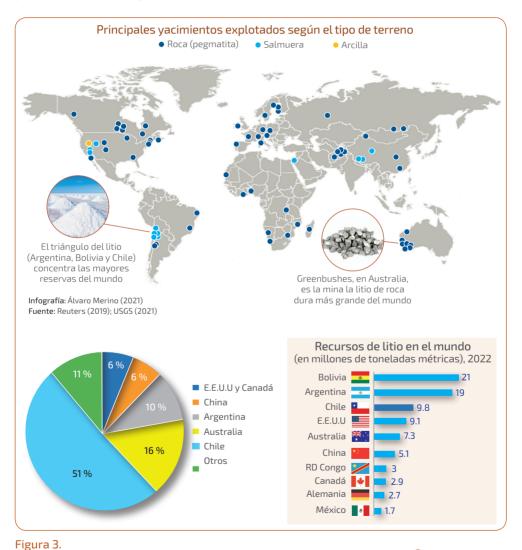
Tabla 2. Tipos de depósitos de recursos de litio.

Tipo	Tipos de depósitos	Particip. a nivel mundial	Estado natural	Ubicación mayores depósitos
Pegmatitas	Espodumeno, petalitas, lepidolitas, amblogonita, eucriptita y mica.	27 %	Roca dura (a partir de magma cristalizado bajo la superficie terrestre).	Australia, EE. UU., RDC, Canadá.
Salmueras en reservorios acuíferos	Salares y lagunas continentales.	60 %	Salmuera (arena, agua y sales minerales).	Triangulo de litio (Chile, Argentina, Bolivia), Zabuye (China).
Salmueras en depósitos geotermales	Acuíferos formados por la circulación de aguas calientes a partir de fracturas terrestres.	3 %	Solución salina disuelta a altas temperaturas junto a otros minerales.	Frontera California - México, Alemania (Rhine Graben), norte de Chile.
Rocas sedimentarias	Arcillas, toba vol- cánica, roca evapo- ritas lacustres.	7%	Rocas minerales de es- mectita (arcilla) y jadari- ta (evaporita lacustre).	EE. UU., México (Sonora), Chile (Llamara).
Zeolitas	Capas de jadarita, mi- neral de silicato de la familia de las zeolitas.	3 %	Jadarita (evaporita lacustre).	Serbia (Jadar).

Fuente: USGS science for a changing word. Bradley et al., (2017).

Los depósitos de salmueras son los más abundantes a nivel mundial. Según datos del Ministerio de Minería de Chile, en el Salar de Atacama, Chile ha producido un total acumulado de alrededor de 1.149.000 toneladas de carbonato de litio, 61.400 toneladas de hidróxido de litio y 43.000 toneladas de cloruro de litio desde 1984 hasta 2020 (Cabello, 2022). Además, Chile ha experimentado un crecimiento significativo en la producción de litio en los últimos años, pasando de alrededor de 8.000 toneladas al año a 64.000 toneladas en 2020 (Toro et al., 2022).

En términos de producción mundial de litio en minerales, se estima que en 2018 se produjeron alrededor de 84.700 toneladas, incluyendo litio contenido en carbonato de litio, cloruro de litio, hidróxido de litio y concentrados de litio en minerales (Desarrollo Minero, 2021). Según un informe de McKinsey, en 2021, casi el 90% de la extracción de este metal se realizó en solo tres países: Australia, Chile y China (Azevedo *et al.*, 2022).



Principales yacimientos de litio. Fuente: USGS, (2021).

PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE LITIO

En la industria del litio, la extracción se realiza a partir de dos fuentes principales: salmuera y mineral. En salares como el Salar de Atacama en Chile, se extrae la salmuera, que luego se concentra y purifica para obtener carbonato de litio. Por otro lado, el mineral de espodumeno se extrae de minas en diferentes partes del mundo y se procesa para obtener hidróxido de litio. Ambos productos son utilizados en la fabricación de baterías de litio y otros productos químicos. Esta diversidad de métodos de extracción garantiza un suministro global de litio para satisfacer la creciente demanda en la industria de la energía limpia.

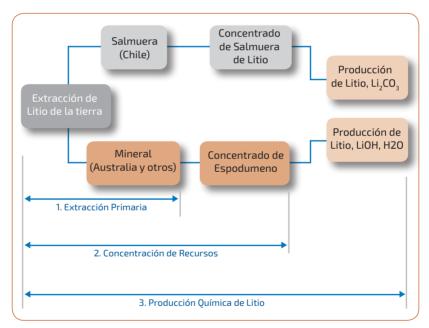


Figura 4.

Proceso para la obtención de Carbonato de litio y oxido de litio. Fuente: Kelly *et al.*, (2021).

1. Proceso productivo a partir de salares

El litio es extraído bombeando la salmuera a la superficie con el objetivo de concentrarlo en pozas de evaporación en una serie de estanques solares (método convencional). Esta solución, rica en litio, luego se procesa para producir carbonato de litio o hidróxido de litio como se observa en la Figura 5. Los principales productores de salmuera del mundo son Chile y Argentina, y en menor medida China (USGS, 2014).

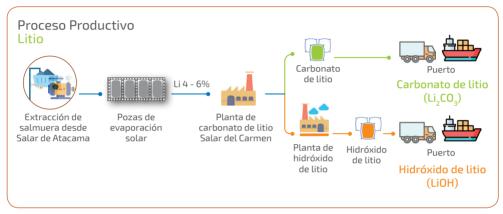


Figura 5.

Proceso realizado total o parcialmente en el Salar de Atacama y el Salar del Carmen. Fuente: SOM, (2018).

2. Proceso productivo a partir de pegmatitas (mineral)

En el caso de los minerales que contienen litio, estos son sometidos a un proceso de concentración, el cual comprende chancado, molienda y flotación (Figura 6). De este, se obtiene un concentrado de litio con una ley de 6,00 a 7,00% de óxido de litio (Li_2O).

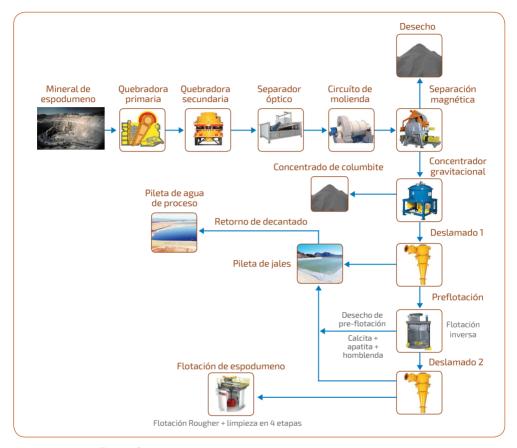


Figura 6.

Diagrama de flujo para producir espodumeno por flotación. Fuente: Adaptado de Facultad de Ingeniería UdeC, (2022).

En la Figura 7 se observa el proceso en el cual el concentrado de espodumeno natural o en forma alfa es transformado por calcinación a la forma beta. Tras este proceso se realiza una tostación ácida, que consiste en un tratamiento en caliente con ácido sulfúrico. Posteriormente, la mezcla de sulfato de litio, mineral residual y con exceso de ácido, pasa por un proceso de lixiviación para la obtención de soluciones de sulfato de litio. Estas soluciones son consecutivamente neutralizadas, purificadas y concentradas en evaporadores de triple efecto. Finalmente, tras un tratamiento con carbonato de sodio se obtiene carbonato de litio.

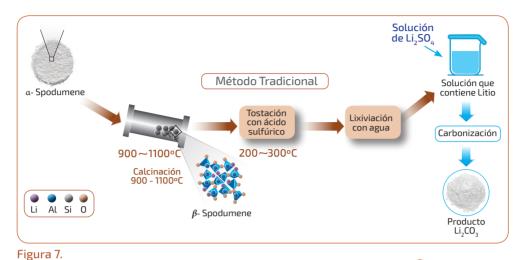


Diagrama de flujo de extracción de espodumeno. Fuente: Riquelme, (2023).

FLOTACIÓN DE ESPODUMENO

La producción de espodumeno en una mina puede variar, pero se estima que la ley promedio de litio en el espodumeno es de alrededor del 1-1.5% (Xie *et al.*, 2020).

Después de la extracción, el espodumeno se somete a un proceso de chancado para reducir el tamaño de las rocas a fin de obtener un tamaño de partícula adecuado para la flotación. Por lo general, se utilizan trituradoras de mandíbula o giratorias para realizar la trituración primaria para llegar a $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{4}$ pulgadas.

Una vez que el espodumeno ha sido chancado, se procede a la etapa de molienda. El objetivo es reducir aún más el tamaño de las partículas para mejorar la liberación del litio. Esto se logra mediante el uso de molinos de bolas o molinos SAG para moler el espodumeno hasta un tamaño de partícula adecuado, aunque la granulometría objetivo puede variar según las características del mineral y los requisitos del proceso. Seguido de la molienda, el espodumeno molido se mezcla con agua y se agrega una serie de reactivos químicos en un circuito de flotación. Los reactivos utilizados pueden incluir colectores, espumantes y modificadores de pH. En el proceso de flotación, se separa el espodumeno de los minerales de ganga, como el cuarzo y el feldespato.

En la Figura 8 se observa la interacción del colector (generalmente un ácido graso o un jabón) con las partículas de espodumeno. Estas se adhieren a las burbujas de aire para que floten hacia la superficie. La dosis típica de colector puede variar entre 50 y 200 g/tonelada (Xie et al., 2020).

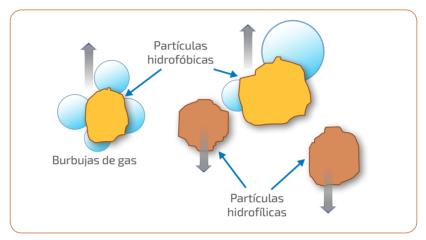


Figura 8.

Adhesión selectiva entre las burbujas y las partículas hidrofóbicas Fuente: Adaptado de Whelan and Brown, (1956).

Se agrega un espumante para estabilizar la espuma y mejorar la recuperación del espodumeno flotado. La dosis típica de espumante puede variar entre 10 y 100 g/tonelada, junto a todos estos parámetros, se ajusta el pH del circuito de flotación utilizando modificadores de pH, como hidróxido de sodio o ácido sulfúrico, para optimizar la flotación del espodumeno. El rango de pH óptimo puede variar según el sistema, pero generalmente se encuentra entre 9 y 11 (Xie et al., 2020).

Durante la flotación, el espodumeno flota en la superficie de la celda de flotación, mientras que los minerales de ganga se hunden y se descartan (Figura 9). El espodumeno flotado se recolecta y se envía a la siguiente etapa del proceso.

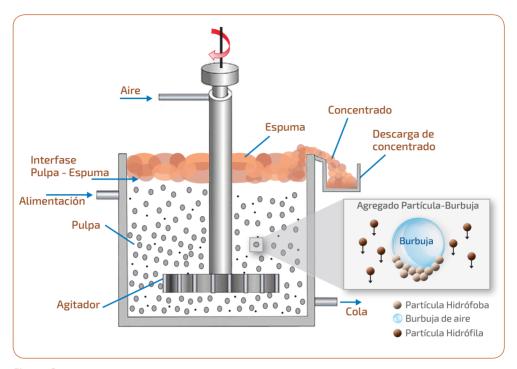


Figura 9.

Diagrama del proceso de flotación y esquema del agregado partícula – burbuja. Fuente: Adaptado de Wills & Finch, (2015).

Una vez que se ha recolectado el espodumeno flotado, se somete a un proceso de recuperación del litio. Esto puede incluir etapas adicionales, como la calcinación y la lixiviación, para extraer el litio del espodumeno y obtener un concentrado de litio (Figura 10).

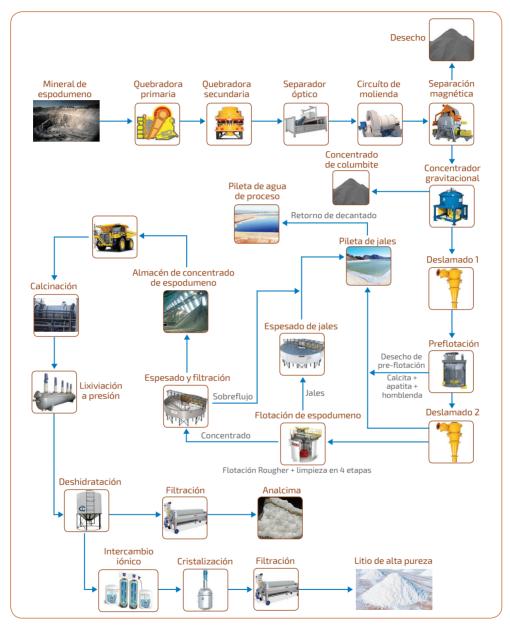


Figura 10.

Diagrama de flujo para producir espodumeno por flotación. Fuente: Facultad de Ingeniería UdeC, (2022).

DEMANDA DE ENERGÍA Y AGUA DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE LITIO

a) Consumo Energético

La producción de carbonato de litio desde el mineral de espodumeno en China es intensiva en energía debido a varios factores como los procesos de extracción, trituración, molienda y concentración del litio, así como la conversión del sulfato de litio en carbonato de litio. En contraste, la producción de carbonato de litio a partir de salmueras en Chile puede ser menos intensiva en energía debido a los procesos de evaporación y concentración, que son más eficientes energéticamente. Además, las condiciones naturales en los salares chilenos, como la alta insolación, pueden facilitar estos procesos, potencialmente reduciendo el consumo de energía. En general, el consumo energético varía según la fuente de extracción del litio y el país donde se procese, siendo China más intensiva en energía en comparación con Chile (Kelly et al., 2021).

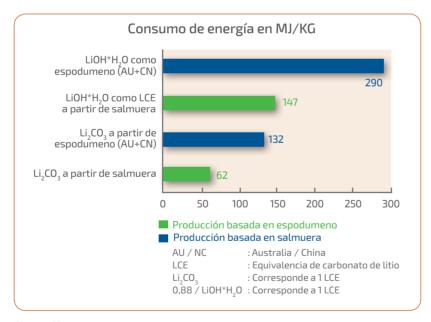


Figura 11.

Consumo energético de salmuera y espodumeno. Fuente: Producción Sustentable, (2020).

b) Consumo de recurso hídrico

El mayor consumo de agua en la producción de hidróxido de litio, desde el mineral de espodumeno en China, puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, el proceso de extracción y concentración del litio del espodumeno requiere el uso de agua en etapas como la trituración, molienda y separación del mineral. Estos procesos mecánicos y químicos necesitan grandes cantidades de agua para su ejecución. Además, la conversión del sulfato de litio en hidróxido de litio también puede requerir una cantidad considerable de agua para los procesos químicos involucrados.

Por otro lado, la producción de hidróxido de litio a partir de salmueras en Chile puede ser menos intensiva en agua debido a la naturaleza de los procesos. La extracción de litio de las salmueras generalmente implica procesos de evaporación y concentración, donde el agua se elimina para concentrar los compuestos de litio. Aunque estos procesos también requieren agua, pueden ser más eficientes en términos de consumo de este recurso en comparación con la extracción y procesamiento del mineral de espodumeno (Kelly et al., 2021).

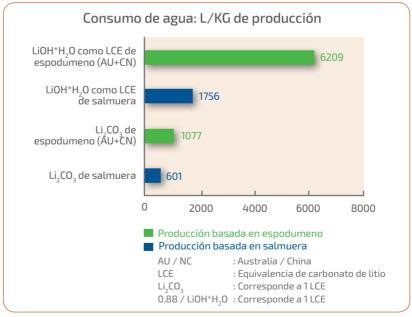


Figura 12.

Consumo hídrico de salmuera y espodumeno. Fuente: Producción Sustentable, (2020).

CONCLUSIONES

El litio es un metal crucial en la industria de baterías y energía renovable debido a sus propiedades físicas y químicas altamente valoradas, así como su creciente demanda en el sector industrial y tecnológico.

El litio se obtiene principalmente de dos fuentes: salmueras en salares y minerales como el espodumeno. Chile destaca como uno de los principales productores a nivel mundial, principalmente a través de salares como el Salar de Atacama.

Los procesos de extracción varían según la fuente de litio. En el caso de las salmueras, se emplea principalmente la evaporación y concentración, mientras que para el espodumeno se requieren etapas como chancado, molienda, flotación y procesos químicos adicionales.

La producción de litio desde salmueras tiende a ser menos intensiva en agua y energía en comparación con la extracción desde el espodumeno. Los procesos químicos y electroquímicos asociados con la extracción de litio desde el espodumeno en China son particularmente intensivos en energía y agua.

La eficiencia hídrica y energética varía según la fuente de extracción y el país donde se procese el litio. Chile, con su abundancia de salares y condiciones naturales favorables, puede tener ventajas en términos de eficiencia en comparación con otros países como China.

La optimización de los procesos de extracción y la reducción del consumo de recursos son cruciales para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la industria del litio. La investigación continua y el desarrollo de tecnologías más eficientes son fundamentales para abordar estos desafíos.

La cooperación entre empresas, instituciones académicas y gobiernos es esencial para promover prácticas más sostenibles en la producción de litio. Además, la regulación adecuada puede ayudar a garantizar estándares ambientales y sociales en toda la cadena de suministro de litio.

REFERENCIAS

- Álvarez, J. P. 2023. Cuatro países producen más del 96% del litio del mundo: dos son latinoamericanos.

 Disponible en: https://www.bloomberglinea.com/2023/07/13/cuatro-paises-producen-mas-del-96-del-litio-del-mundo-dos-son-latinoamericanos/
- Azevedo, M., Baczyńska, M., Hoffman, K., & Krauze, A. 2022. La minería del litio: Cómo las nuevas tecnologías de producción podrían impulsar la revolución mundial de los vehículos eléctricos.
 Disponible en: https://www.mckinsey.com/featured-insights/destacados/la-mineria-del-litio-como-las-nuevas-tecnologias-de-produccion-podrian-impulsar-la-revolucion-mundial-de-los-vehiculoselectricos/es
- Bradley, D.C., Stillings, L.L., Jaskula, B.W., Munk, LeeAnn, and McCauley, A.D. 2017. Lithium, chap. K of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. K1–K21. Disponible en: https://doi.org/10.3133/pp1802K.
- Cabello, J. 2022. Reservas, recursos y exploración de litio en salares del norte de Chile. Andean Geology, 49(2), 297.
 Disponible en: https://doi.org/10.5027/andgeov49n2-3444
- Cochilco. 2018. Mercado internacional del litio y su potencial en Chile.
 Disponible en: https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/ Informe%20Litio%209%2001%202019.pdf
- Dirección General de Desarrollo Minero. 2021. Perfil de mercado de litio. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/624816/15Perfil_Litio_2020__T_.pdf
- El País S. L, E. 2023. Avanza la estrategia nacional del litio en Chile: la estatal Codelco acuerda con SQM explotar en conjunto el Salar de Atacama hasta 2060.
 - Disponible en: https://elpais.com/chile/2023-12-27/avanza-la-estrategia-nacional-del-litio-en-chile-la-estatal-codelco-acuerda-consqm-explotar-en-conjunto-el-salar-de-atacama-hasta-2060.html

- Facultad de Ingeniería UdeC. 2022. Desafíos de los procesos de extracción directa de litio. Disponible en: https://fi.udec.cl/eventos/desafios-de-los-procesos-de-extraccion-directa-de-litio/
- Kelly, J. C., Wang, M., Dai, Q., & Winjobi, O. 2021. Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithiumion battery cathodes and lithiumion batteries. Resources, Conservation and Recycling 174(105762), 105762.
 Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762
- Lenntech. (s/f). Litio (Li) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. Disponible en: https://www.lenntech.es/periodica/elementos/li.htm
- SQM. 2020. Producción Sustentable. Disponible en: https://www.sqmlithium.com/nosotros/produccion-sustentable/
- SQM. 2018. Procesos de producción. Disponible en: https://www.sqm. com/acerca-de-sqm/recursos-naturales/proceso-de-produccion/
- U.S. Geological Survey. 2019. Mineral Commodity Summaries.
 Disponible en: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/as-sets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf
- Valenzuela, A., & Andrea, C. 2015. Estudio y caracterización de ánodos de litio metálico. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132023
- Wills, B. A., & Finch, J. H. 2015. Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (8 ed.). Oxford, England: Butterworth-Heinemann.
- Whelan, P. F. 1956. Particle—bubble attachment in froth flotation. Trans. Inst. Min. Metall., 65, 181–192.
- Statista. 2023. Países líderes en la producción de litio a nivel mundial. Disponible en: https://es.statista.com/estadisticas/600308/paises-lideres-en-la-produccion-de-litio-a-nivel-mundial/.
- Toro, R. B., Echenique, G. M., & Ballesteros., N. P. 2022. Litio en Chile. Disponible en: https://www.minmineria.cl/wp-content/ uploads/2022/03/MinMineri%CC%81a-2022-Litio-1.pdf

- Xie, R., Zhu, Y., Liu, J., Li, Y., Wang, X., & Shumin, Z. 2020. Research Status of Spodumene Flotation: A Review. *An International Journal*, 42(5), 321–334.
- Yañez, O. 2021. Mirada actual y desafíos futuros para Chile. Webinar de Litio. Disponible en: https://imetchile.cl/wp-content/uploads/2021/12/Desafios-del-litio-en-Chile-O.Yanez-SQM.pdf



PRODUCCIÓN DE LITIO DESDE EL ESPODUMENO: ENFOQUE EN EFICIENCIA HÍDRICA Y ENERGÉTICA









