



ALIANZA
HUMEDALES
ANDINOS

Vigilancia tecnológica de los métodos de extracción de litio: Una Evaluación Crítica

Policy Brief N° 3 | Julio 2025



Vigilancia tecnológica de los métodos de extracción de litio: Una Evaluación Crítica

Policy Brief N° 3 | Julio 2025



**ALIANZA
HUMEDALES
ANDINOS**

La Alianza de Humedales Andinos reúne a organizaciones de la sociedad civil, comunidades locales y movimientos socioambientales en Argentina, Bolivia y Chile, cuyo objetivo es la protección, conservación y defensa de los humedales andinos en territorios campesinos e indígenas. El enfoque del trabajo de la alianza se basa en la conservación ambiental, el respeto a los derechos humanos y la justicia ambiental ante la crisis ecológica y climática.



FUNDACIÓN TANTÍ



FIMA
ONG



Defensa Ambiental
ong



La Alianza de Humedales Andinos en Chile se compone de las siguientes organizaciones:

Fundación Tantí

<https://www.fundaciontanti.org/>

ONG FIMA

<https://www.fima.cl/>

ONG Defensa Ambiental

<https://www.ongdefensaambiental.cl/>

Formando Rutas

<https://formandorutas.tech/>

En este volumen colaboraron:

Autora: Ingrid Garcés Millas (Observatorio Plurinacional de Salares Andinos)

Edición: Paulina Hidalgo (Fundación Tantí), Cynthia Escares (ONG Defensa Ambiental), Javiera Pérez (ONG FIMA) y Antonio Pulgar (ONG FIMA).

Fotografías: Ramón Balcázar, Aline Juárez, Javiera Pérez Santos.

RESUMEN

Este documento analiza el estado actual de la vigilancia tecnológica en torno a la extracción de litio en salares ricos en este mineral. El objetivo principal es identificar y evaluar el desarrollo de tecnologías de extracción directa de litio, en comparación con el método tradicional, basado en la evaporación de salmueras. Se ofrece una revisión crítica de las técnicas convencionales y sus impactos ambientales, seguida de un análisis de las tecnologías emergentes que han alcanzado mayores niveles de madurez tecnológica. Se describen los principios de funcionamiento, las limitaciones técnicas y los riesgos ambientales asociados a los principales métodos de extracción directa de litio. Se concluye evaluando si estas nuevas tecnologías tienen el potencial de transformar sustancialmente la producción de carbonato de litio en los salares andinos y si su aplicación es viable y sostenible a largo plazo. Finalmente, se proponen recomendaciones orientadas a fortalecer el conocimiento científico independiente para los procesos institucionales y comunitarios de toma de decisiones que aseguren resguardo de territorios marcados por una alta vulnerabilidad climática y la pérdida de biodiversidad.

ABSTRACT

This document analyzes the current state of technology monitoring related to lithium extraction in salt flats rich in this mineral. The primary objective is to identify and assess the development of direct lithium extraction (DLE) technologies in comparison to the traditional method based on brine evaporation. A critical review of conventional techniques and their environmental impacts is presented, followed by an analysis of emerging technologies that have reached higher levels of technological maturity. The operational principles, technical limitations, and environmental risks associated with the main direct lithium extraction methods are described. The study concludes by evaluating whether these new technologies have the potential to substantially transform lithium carbonate production in the Andean salt flats and whether their application is viable and sustainable in the long term. Finally, the document offers recommendations aimed at strengthening independent scientific knowledge to support institutional and community decision-making processes that ensure the protection of territories characterized by high climate vulnerability and biodiversity loss.

1. Introducción

1.1. Contexto global del litio y su importancia estratégica

El litio se ha convertido en un recurso estratégico para la economía mundial debido a su rol en la fabricación de baterías recargables utilizadas en dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energías renovables. Su importancia ha crecido en el contexto de la transición energética global, impulsando una demanda exponencial desde inicios del siglo XXI. Según la Agencia Internacional de Energía, esta demanda podría multiplicarse por cinco en la próxima década, principalmente por la expansión de la movilidad eléctrica y las energías limpias¹.

Países como China, Estados Unidos, Japón, Corea del Sur y la Unión Europea han desarrollado estrategias para asegurar el acceso al litio, necesario para su seguridad energética y tecnológica. Esta competencia ha generado inversiones en exploración y procesamiento, pero también tensiones geopolíticas debido a la concentración geográfica de las reservas.

Entre 2014 y 2023, la demanda de litio para baterías pasó del 35% al 87%, y se estima que para 2050 podría alcanzar entre 1,2 y 1,7 millones de toneladas². Este crecimiento ha intensificado la presión sobre los ecosistemas donde se extrae el mineral, afectando los sistemas hídricos, la biodiversidad y a las comunidades indígenas que los habitan. Por otra parte, los países productores enfrentan el desafío de adoptar tecnologías más sostenibles que garanticen la competitividad sin comprometer los derechos sociales ni el equilibrio ambiental.

1.2. Problemática ambiental y social relacionada a su forma de extracción

Uno de los principales problemas asociados a la minería de litio es el consumo masivo de agua, especialmente en regiones áridas como es el

1 Foro Económico Mundial. (2023). Litio: por qué Latinoamérica es clave para la transición energética mundial. Foro institucional. Disponible en: <https://es.weforum.org/stories/2023/01/litio-por-que-america-latina-es-clave-para-la-transicion-energetica-mundial/>

2 Ministerio de Economía, Gobierno de Argentina. (2024). Informes de cadena de valor. Minería: litio. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_sectorial_litio_2024-2.pdf

caso del Salar de Atacama en Chile. El método tradicional de extracción mediante evaporación solar implica bombear salmueras a 30 metros de profundidad del salar, las que se depositan en grandes piscinas para concentrar el litio. Este proceso no sólo consume grandes volúmenes de agua en ecosistemas hiperáridos, sino que también genera desechos salinos que alteran el equilibrio químico y físico del salar³.

Así, dentro de los impactos ambientales que produce la industria del litio está la pérdida neta de agua en sistemas que ya presentan un estrés hídrico considerable. A esto se suma la baja eficiencia del método de evaporación, que recupera entre el 30% al 40% del litio presente en la salmuera, y además, un proceso que dura entre 14 a 18 meses para completar un ciclo productivo⁴. Si bien su bajo costo —por el uso de energía solar y tecnología simple— ha favorecido su adopción, los costos ecológicos y sociales no son menores. Recientemente, la evidencia científica ha cuantificado los impactos ambientales negativos con publicaciones del 2019⁵, las cuales no han podido ser objetadas.

Frente a estas limitaciones, en los últimos años han surgido tecnologías de extracción directa de litio (DLE por sus siglas en inglés, en adelante EDL), que prometen ser más eficientes y menos dañinas. Incluyen procesos como la adsorción, el intercambio iónico, la separación por membranas y la extracción electroquímica, entre las más conocidas. Sin embargo, muchas de estas tecnologías aún están en fase experimental o en pruebas piloto y enfrentan desafíos técnicos y económicos antes de su implementación a gran escala.

Como cada salmuera tiene una composición única, es necesario adaptarlas antes de ser aplicadas al procesamiento específico. Lo que puede ser apropiado u óptimo para un salar, no necesariamente lo sea para otro. Aunque la EDL promete ventajas sobre el método tradicional, aún no se han implementado comercialmente en salares sudamericanos debido a incertidumbres sobre su eficacia y efectos ambientales. Ofrece tasas de recuperación del 70 % al 95 %, reduce el uso de salmuera y

3 Flexer V, Baspineiro C. & Galli C.I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Sci Total Environ.* 639:1188-1204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.223. Epub 2018 May 26. PMID: 29929287; Garcés, I. & Álvarez, G. (2020)

Water mining and extractivism of the Salar de Atacama, Chile. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 245, 189-199. DOI: 10.2495/EID200181

4 Kaunda, R. B. (2020). Social impacts of lithium mining: An institutional perspective from Chile. *Resources Policy*, 65, 101582.

5 Garcés, I. & Álvarez, G. (2020) Op. cit; Flexer, V., Baspineiro, C. & Galli, C.I. (2018). Op. cit.

acorta los tiempos de producción. Sin embargo, requiere de agua dulce y energía, y presenta una huella ambiental significativa. Por un lado, la reinyección de salmueras agotadas podría contribuir a mitigar la caída de los niveles freáticos y proteger los ecosistemas sensibles, como las lagunas altoandinas; sin embargo, esto puede alterar la geoquímica del salar y afectar el equilibrio hidrológico debido a diferencias significativas respecto a la salmuera original⁶. Existe el riesgo de que la reinyección diluya las concentraciones de litio y altere la estratigrafía del sistema.

A pesar de su potencial, la EDL debe ser evaluada cuidadosamente en cada contexto antes de su aplicación a gran escala. Más allá de lo técnico, es clave cuestionar la narrativa del desarrollo económico ligada al litio, especialmente en la transición energética. Aunque esencial para baterías y vehículos eléctricos, su creciente demanda puede agravar la escasez de agua y vulnerar los derechos de las comunidades locales asociadas a los ecosistemas de salares. La expansión minera en territorios sensibles exige evaluar críticamente tecnologías como la EDL debido a que enfrenta desafíos técnicos y económicos, como la necesidad de adaptación a cada salar y las dificultades para su escalamiento industrial sostenible.

Más allá de los aspectos técnicos, se requiere una reflexión crítica sobre el modelo de desarrollo económico asociado a la minería de litio. Si bien este mineral es útil para la producción de tecnologías de transición, su extracción puede reproducir lógicas de hiperconsumo en países de alta renta, mientras que localmente se profundizan modelos extractivistas que históricamente han marginado a las comunidades locales, especialmente pueblos indígenas, cuyos derechos territoriales y acceso al agua se ven comprometidos⁷. Por tanto, cualquier política pública o decisión administrativa sobre la minería de litio debe considerar no sólo la eficiencia tecnológica, sino también una observancia estricta de la normativa vigente, con miras a asegurar la equidad social y la sostenibilidad ambiental global y territorial.

En suma, la minería de litio enfrenta un dilema entre la urgencia de la transición energética y la necesidad de proteger ecosistemas frágiles y comunidades vulnerables. La innovación tecnológica como la EDL

6 Liu, W., Zheng, M., & Lu, X. (2021). Environmental implications of lithium extraction from salt lakes: A critical review. *Environmental Science & Technology*, 55(11), 7084–7097.

7 Zicari, J., Gudynas, E., & Alayza, A. (2022). Transición energética y extractivismos: dilemas del litio en América del Sur. *Revista de Ecología Política Latinoamericana*, 4(1), 45–63.

puede ofrecer alternativas prometedoras, pero su adopción debe estar acompañada de marcos regulatorios robustos, la participación comunitaria informada y evaluación de impacto ambiental integrales, sinérgicos y acumulativos que consideren la complejidad socioterritorial en donde se insertan las diversas actividades extractivas existentes en los territorios y cuencas.

1.3. Situación de la explotación del litio en la región

Los salares son algunos de los sistemas naturales más complejos del mundo. Su formación es un proceso que requiere condiciones geológicas, geomorfológicas y medioambientales muy específicas, además de largos períodos de tiempo. Durante este proceso, se producen interacciones entre la atmósfera, la hidrósfera y la litósfera. La vida de este ecosistema, comúnmente llamado “salar”, está dada por el agua, que en estos largos períodos se enriquece e interactúa con el medio a través de diversas reacciones químicas y biológicas que se manifiestan durante su existencia. Finalmente, se forma una salmuera enriquecida en diferentes sales, según cada cuenca. En resumen, para formar un ecosistema salino con presencia de litio se necesitan seis factores: un clima árido; una cuenca cerrada; actividad ígnea y/o hidrotermal asociada; subsidencia debido a la tectónica (que crea espacio para la afluencia y el relleno continuo); fuentes de litio adecuadas; y un tiempo suficiente para concentrar el litio en la salmuera.

Los salares sudamericanos que representan la mejor y más importante presencia de litio se encuentran entre 2.300 y 4.000 metros sobre el nivel del mar en la región andina. La combinación de altitud, irradiación solar y aridez, los convierten en uno de los ambientes más extremos de la Tierra. Estas condiciones hacen que los salares tengan una flora y fauna únicas, incluidos los microorganismos, que a su vez conforman ecosistemas diversos y poco comunes, y hoy se asocian con microorganismos extremófilos. Alrededor de estos, se han asentado comunidades de pueblos originarios, que mantienen estrechas relaciones sociales y culturales con los salares. Para todos los usuarios de estas cuencas hidrográficas donde se ubican los salares, el agua es el elemento fundamental para el sustento y su forma de vida.

El procesamiento de salmuera de litio requiere agua dulce, por lo que a medida que aumenta la exploración de litio, las estimaciones precisas de su disponibilidad en una región donde los recursos hídricos son tan limitados, son fundamentales para las decisiones de gestión. Los modelos hidrológicos utilizados para determinar la disponibilidad del agua, así como las consecuencias de su extracción en el medio ambiente presentan errores y una representatividad errada respecto a la magnitud de agua dulce disponible, como evidencia un reciente estudio hidroló-

gico de la Universidad de Massachusetts⁸. Esto ha puesto en amenaza la salud ecológica de los ecosistemas de las lagunas altiplánicas donde se encuentra el litio, fundamental para la vida de la fauna local y migratoria, así como de la flora en particular. Además, el agua es un elemento de importancia vital para las comunidades indígenas locales de la Región Circunpuneña o la Puna de Atacama, todas ellas dependen del agua dulce disponible a nivel subterráneo y superficial.

La búsqueda de métodos de reemplazo más eficientes al método de evaporación de salmueras ha significado una prioridad en estos últimos años, y los gobiernos de Bolivia, Chile y Argentina apoyan firmemente el uso de tecnología de EDL en los proyectos nuevos. ¿Pero qué tan prometedoras son las tecnologías de EDL?, ¿por qué no se ha generalizado su uso? La respuesta no es simple y tiene que ver con la complejidad de las salmueras. Cada una es única, experimentalmente funcionan a escala laboratorio, pero en un nivel productivo es diferente. Tienen un comportamiento químico complejo en cuanto a calidad, cantidad y variación de los tipos de aguas, lo que significa que, si bien funciona en un determinado proceso con un tipo de salmuera, esto no es duplicable a otro salar.

Cada etapa, tanto en la extracción, el procesamiento y la reinyección de salmueras, plantea desafíos técnicos que deben superarse a gran escala, con lo cual cada salmuera requiere un enfoque adaptado. Una tecnología de EDL que funciona bien en un salar determinado, quizás no funcione en otro. Se suma que estas tecnologías requieren mayor cantidad de agua dulce y toda la infraestructura operacional también consume más energía. Sin embargo, estos métodos extraen el litio de la salmuera y en paralelo, o una vez que este se agota, se reinyecta la salmuera al salar, lo que genera un impacto que aún no ha sido investigado, pudiendo llegar a ser un daño irreversible al ecosistema, considerando la microbiota existente bajo la superficie.

En Argentina, pese a que la EDL se ha utilizado hace algunos años en el Salar del Hombre Muerto, el método tradicional sigue siendo el utilizado. La operación se inicia con gigantescas máquinas, tubos, evaporadores y purificadores que procesan salmueras extraídas del subsuelo del salar hasta llevarla de un 0,06% a un 0,15% en litio que luego se envía a las pozas de evaporación, donde después de varios meses la salmuera se concentra al 6% en litio. La eficiencia de extracción del proceso de evaporación conocido como 'cal-soda' no excede el 30%-40%, debido a la alta solubilidad del carbonato de litio, aun a 85°C (9,5 gramos por

8 Kirshen, A.B., Moran, B.J., Munk, L.A. et al. (2025) Freshwater inflows to closed basins of the Andean plateau in Chile, Argentina, and Bolivia. *Commun Earth Environ* 6, 177.

litro)⁹. El consumo de agua dulce aquí es el doble¹⁰ en relación al promedio de concentración que se usa en el Salar de Atacama y en el Salar de Olaroz (Argentina¹¹). El Salar Centenario-Ratones, que se encuentra a una altitud de 4.000 m.s.n.m en la provincia de Salta, aloja una planta que entró recientemente a operar a fines del año 2024 (compañía Eramet) con 19 pozos que bombean las salmueras desde 400 metros, muy por debajo del nivel freático, y que emplean un filtro especialmente diseñado en los laboratorios en Francia. Se espera una producción de 24.000 toneladas anuales de carbonato de litio (24 k de LCE)¹² para este 2025.

En el norte de Chile, la empresa CleanTech Lithium, por medio de licencias de exploración, tiene la intención de realizar EDL en Laguna Verde y la Cuenca Laguna del Negro Francisco, en la región de Atacama. En el primer sitio, la empresa ha llevado a cabo pruebas experimentales con extracción de salmueras a escala industrial, sin embargo, aún no se tiene conocimiento público de sus resultados. Si bien ha comenzado a trabajar con salmueras en el Salar de Maricunga, a modo de planta piloto, aún no se han divulgado los resultados definitivos, pero sí prometen ser auspiciosos, aunque no existen estudios que posibiliten elaborar una evaluación certera desde la mirada ecosistémica¹³.

2. Análisis de los métodos de extracción de litio proyectados

De acuerdo con la geología de yacimientos, los depósitos de litio provenientes de salmueras pertenecen a la clasificación de tipo exógenos. En ella se incluyen: lagos salinos, salmueras profundas, aguas geotermales, depósitos volcánicos (jadarita [LiNaSiB 3 O 7 [OH]]) y del tipo arcilla. Estos son diferentes de los yacimientos endógenos de litio, conformados por pegmatitas, granito y greisen, los magmático-hidrotermal y los de tipo criptoexplosión.

9 Calvo, E. (2022). Nuevos métodos de extracción directa de litio. Impacto en la explotación sustentable de los salares de la puna. Volumen 30 número 180 junio – julio. INQUIMAE, FCEN, UBA.

10 Por toneladas de carbonato de litio producido.

11 Vera, M.L., Torres, W.R., Galli, C.I., et al. (2023). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nat Rev Earth Environ* 4, 149-165 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>.

12 Carbonato de Litio Equivalente.

13 Bordeau, A. (2021). Sistema Hidrogeológico Salar de Maricunga-Quebrada de Paipote: Un aporte a la línea base de la comunidad colla El Bolo, Región de Atacama. Memoria para optar al Título de: Geólogo. Depto. De Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Los depósitos en Sudamérica tienen su mineralización y concentración por acción de la energía solar, por las interacciones de la litósfera con la hidrósfera, la atmósfera y la biósfera, y a bajas temperaturas y presiones cerca de la superficie. Estas condiciones hacen que los depósitos sean complejos y únicos (Figura 1).

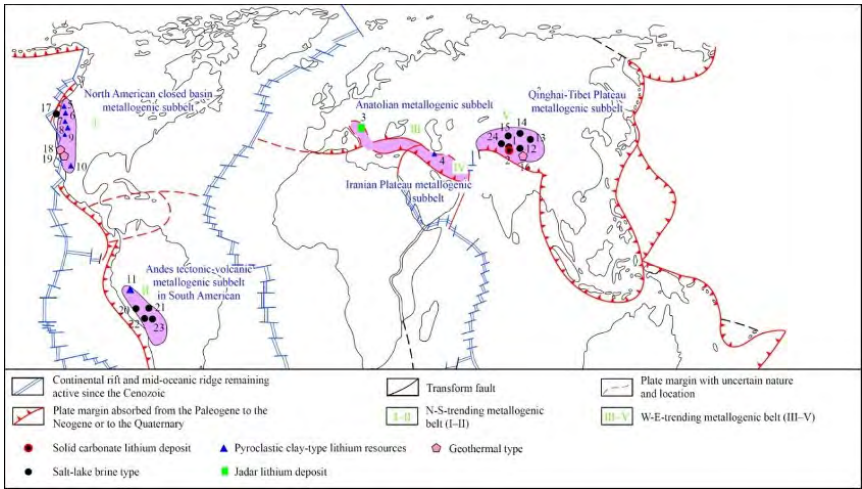


Figura 1. Mapa de distribución de los recursos globales de litio exógeno del Cenozoico. 1-Depósito de carbonato sólido en el lago salado de Zabuye; 2-Depósito de litio de tipo salmuera en el lago salado de Zabuye; 3-Depósito de litio de Jadar; 4-Recursos de litio iraníes; 5-Recursos de litio de Big Sandy; 6-Recursos de litio de Silver Peak; 7-Recursos de litio de Northern Clayton; 8-Recursos de litio de Tonopah; 9-Recursos de litio de Thacker Pass; 10-Recursos de litio de Sonora; 11-Recursos de litio de Falchani; 12-Lago salado de Dangxiangcuo en el Tíbet; 13-Lago salado de Qarhan en Qinghai; 14-Lagos salados de Jinaier este y oeste en Qinghai; 15-Lago salado de Yiliping en Qinghai; 16-Semi en el Tíbet; 17-Valle de la Muerte en Estados Unidos; 18-Brawley, California, Estados Unidos; 19-Salton, California, Estados Unidos; 20-Grupo de salares de Perú; 21-Salar de Coipasa, Bolivia; 22-Salar de Uyuni, Bolivia; 23-Salar de Atacama, Chile; 24-Lago salado de Chagcam Caka en el Tibet. Fuente: Tomado de Zheng, et al, 2023¹⁴.

14 Zheng, M. P., Xing, E. Y., Zhang, X. F., et al. (2023). Classification and mineralization of global lithium deposits and lithium extraction technologies for exogenetic lithium deposits. China Geology of China. Vol. 6(4), p. 547-56.

2.1. Método tradicional de extracción de litio en salmueras

Los procesos industriales que se realizan en el Salar de Atacama (Chile), Salar de Hombre Muerto y Salar de Olaroz (Argentina), Clayton Valley (EE.UU.); el lago Zabayu (o Zabuye), el lago salado Dongtai y el lago salado Xitai (China), utilizan piscinas de evaporación para concentrar las salmueras en litio que posteriormente son purificadas en plantas de refinación y purificación de carbonato de litio. En varios pasos del procesamiento de refinación y/o purificación se utilizan productos químicos y agua dulce.

Las comunidades aledañas a estos salares son las que han dado a conocer a la luz pública los impactos ambientales y sociales que la industria les ha provocado (pueblo atacameño en el Salar de Atacama^{15,16}, Salar de Hombre Muerto¹⁷, de Olaroz^{18,19} y posteriormente otras comunidades se han sumado²⁰. Los datos aún son bastante limitados y son los mayoritarios los que se relacionan con el Salar de Atacama, y con Clayton Valley por ser éste el primer salar con extracción productiva²¹.

15 Espíndola, C. (2021). Testimonio de mi vida en Toconao y de la presencia de la minería en nuestro territorio lickanantay. En Salares Andinos: Ecología de Saberes por la Protección de Nuestros Salares y Humedales. Observatorio Plurinacional de Salares Andinos. p. 37-39

16 OPSAL (2024). "Comunidades atacameñas mantienen posición en el salar de Atacama y comuneros visibilizan preocupación por impactos de la minería en el medio ambiente". Disponible en: <https://salares.org/comunidades-atacamenas-mantienen-posicion-en-el-salar-de-atacama-y-comuneros-visibilizan-preocupacion-por-impactos-de-la-mineria-en-el-medio-ambiente/>

17 OPSAL (2024). "Argentina: Medida cautelar presentada por Comunidad Atacameños del Altiplano logra detener nuevos permisos mineros en Salar del Hombre Muerto y ordena la medición de impactos acumulativos". Disponible en: <https://salares.org/medida-cautelar-presentada-por-comunidad-atacamenos-del-altiplano-logra-detener-nuevos-permisos-mineros-en-salar-del-hombre-muerto-y-ordena-la-medicion-de-impactos-acumulativos/>

18 Blair, J. (2021) Extractivismo del litio y el problema de la escala: acción climática global y justicia ambiental local. En Salares Andinos: Ecología de Saberes por la Protección de Nuestros Salares y Humedales. Observatorio Plurinacional de Salares Andinos. p.70-71.

19 Jérez, B. (2021). Las desigualdades socioecológicas de la territorialidad extractivista del Triángulo del Litio en los Salares Altoandinos del Cono Sur. En Salares Andinos: Ecología de Saberes por la Protección de Nuestros Salares y Humedales. Observatorio Plurinacional de Salares Andinos. p. 108-109.

20 Jérez, B. (2021). Op cit., 109.

21 Garrett D.E. (2004). Manual de litio y cloruro de calcio natural Academic Press, Oxford, p. 1-47

2.2. Tecnologías de Extracción Directa de Litio: principios, métodos y desafíos

Los métodos de extracción directa de litio son varios, aquí se refieren los más utilizados y que hoy están siendo estudiados. Estos se resumen de acuerdo con el medio de extracción por el cual la salmuera fluye, a través de un material de fijación del litio utilizando procesos de adsorción, intercambio iónico, separación por membranas, o de extracción con solventes, seguido de la solución de purificación para obtener carbonato o hidróxido de litio.

Los procesos operacionales se basan en el bombeo de salmuera a la unidad de procesamiento, donde pasa a través de una resina o algún material de adsorción, logrando extraer sólo litio. De esta manera, la salmuera sin litio puede ser reinyectada nuevamente en la cuenca del acuífero¹⁸. El proceso de EDL se estructura en tres grandes etapas: pre-procesamiento de la salmuera, extracción directa y post-procesamiento (Figura 2).

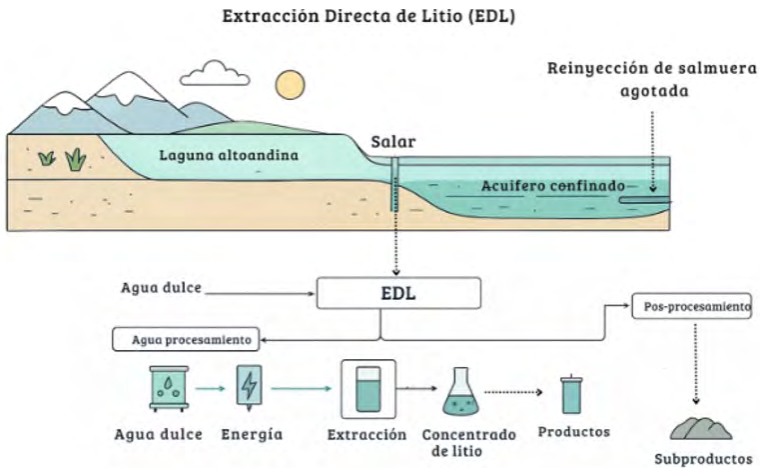


Figura 2. Esquema Extracción Directa de Litio. Figura: Tecnología de Extracción Directa de Litio (EDL). Corte geológico de un salar con sedimentos lacustres, evaporitas y acuífero confinado; muestra pozos de extracción e inyección de salmuera, la integración de agua de proceso en pre-procesamiento, y las fases de extracción directa y pos-procesamiento. Elaboración propia.

Todas las tecnologías mencionadas comparten este esquema general, aunque difieren en los mecanismos empleados durante la fase de extracción:

2.2.1. Pre-procesamiento de la salmuera: En esta etapa inicial, la salmuera extraída del salar es acondicionada para optimizar la recuperación de litio. Esto puede incluir filtración para remover sólidos suspendidos, ajustes del pH, y eliminación de ciertos iones como calcio y magnesio, que pueden interferir en las siguientes etapas. Aunque esta fase no suele consumir grandes volúmenes de agua dulce, sí requiere energía y reactivos químicos, lo que contribuye a la huella ambiental del proceso.

2.2.2. Extracción Directa (tecnología clave): Existen distintas rutas tecnológicas, todas con el objetivo común de separar el litio de otros elementos presentes en la salmuera:

- i. Intercambio Iónico:** Utiliza resinas que capturan selectivamente el litio. Tras la captura, se requiere un lavado con agua dulce para liberar el litio y producir cloruro de litio (LiCl). Se genera salmuera residual empobrecida en litio, la cual es devuelta al salar o tratada como desecho.
- ii. Extracción con Disolventes:** El litio es transferido desde la salmuera hacia un disolvente orgánico selectivo. Posteriormente, es recuperado mediante una etapa de lavado acuoso. Requiere de agua dulce para este lavado y se generan residuos líquidos orgánicos, por esto, existe una doble generación de residuos: salmuera residual y disolvente gastado.
- iii. Electro-Membranas:** Utiliza membranas selectivas y electricidad para extraer el litio. Aunque menos dependiente del agua dulce, tras el proceso se genera la salida de una corriente de salmuera residual. Como impacto ambiental, tiene un consumo eléctrico elevado y salmuera residual a manejar.
- iv. Nanofiltración (NF):** Mediante presión, las membranas de NF separan el litio de otros iones. Esta tecnología requiere agua para limpiar las membranas y dejar la salmuera concentrada como residuo, por lo cual, el proceso tiene un intensivo uso de energía y agua para la limpieza, y una generación del concentrado salino residual.

- v. **Bombeo Iónico Electroquímico:** Atrapa el litio en un sólido, que luego es lavado con agua dulce para la recuperación del metal. Tiene un alto grado de selectividad, pero genera residuos líquidos y requiere de agua dulce.
- vi. **Precipitación Selectiva:** Añadiendo reactivos como fosfato, el litio precipita en forma sólida, dejando una salmuera residual que queda como subproducto a gestionar.
- vii. **Métodos Térmicos Asistidos:** Se emplea el calor para separar el litio. Tiene una alta demanda energética y también produce salmuera residual.

2.2.3. Post-procesamiento y generación de residuos: Todas las tecnologías convergen en la fase donde se obtiene el producto final de litio (generalmente carbonato o hidróxido), y se generan residuos que incluyen salmuera empobrecida que puede ser reinyectada en el salar o almacenada, agua contaminada por los procesos de lavado y residuos sólidos, como precipitados o membranas gastadas. Este paso es crítico, ya que un mal manejo de la salmuera residual puede alterar el balance hídrico y químico de los salares, afectando la biodiversidad y a las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas.

En la Tabla 1 se pueden apreciar las diferencias generales entre el método de extracción de litio por evaporación y por extracción directa; la Tabla 2 resume la efectividad de los diferentes métodos de extracción directa de litio; mientras que la Tabla 3 muestra una comparación de los métodos de extracción de litio.

Ahora bien, conviene recordar que cada salar es un ecosistema único, con una química específica que, de existir minería de litio, requiere procesos de extracción diferenciados. Las salmueras de Bolivia y China, por ejemplo, presentan una alta relación de magnesio-litio, lo que demanda un tratamiento más complejo que el de cloruros utilizados en Argentina y Chile. La variabilidad en salinidad y composición iónica impide aplicar una solución tecnológica única para todos los casos.

Actualmente, las tecnologías de extracción directa de litio se encuentran en etapa piloto y aún no han sido probadas a gran escala. Aunque prometen mayor eficiencia y una menor huella ambiental en comparación con los métodos tradicionales, presentan importantes desafíos.

Entre ellos, destacan el alto consumo de agua dulce y la generación de salmueras residuales, cuyos impactos ambientales y sociales aún no están completamente comprendidos, especialmente en ecosistemas como los salares altoandinos. La potencial aplicación de estas tecnologías debe considerar la consulta indígena previa según los estándares del Sistema Internacional de los Derechos Humanos, y adecuarse estrictamente a los estándares normativos existentes, el monitoreo ambiental riguroso y ejercer un uso racional y sustentable del agua en las cuencas. Además, es clave evaluar el impacto ambiental desde la etapa de bombeo hasta la obtención del producto final de litio sólido y la disposición para exportación en los puertos. Territorialmente, es necesaria una evaluación de impactos acumulativos y sinérgicos.

2.3. Desafíos de la profundización de la extracción de litio

Desde un punto de vista meramente productivo, se propone que la principal ventaja de los métodos de EDL dicen relación con el tiempo de extracción que es de sólo algunas horas, en lugar de los 12 a 18 meses que requiere el método de evaporación. A ello se suman la potencial disminución de los volúmenes de salmuera que deben ser tratados con el método tradicional (la gran cantidad de piscinas que cubren el salar de Atacama, con más de 90 km² registradas en 2017)²². Si se produce 1 tonelada de carbonato de litio en el Salar de Atacama, se requiere evaporar entre 400.000 a 2 millones de litros de agua de salmuera, sumado a los cerca de 5.000 a 50.000 litros de agua dulce en las operaciones de las plantas de tratamiento²³.

Otro punto relevante bajo la perspectiva meramente productiva es que estos métodos no dependen de las condiciones climáticas ni de la composición de la salmuera, generando por lo tanto un mayor rendimiento (70%-90%) al proceso, lo que finalmente se traduce en un menor impacto sobre el medio ambiente.

De acuerdo a los estándares con los que se ha posicionado la idea de EDL, las tecnologías de extracción directa de litio ofrecen una alternativa más rápida y potencialmente menos dañina que los métodos tradicionales de evaporación. No obstante, su efectividad a gran escala aún no ha sido comprobada en Chile, existiendo incertidumbre respecto a

22 Prieto, M. & Sandoval, G. (2018). Informe Expansión de la Extracción de Salmuera en el Salar de Atacama. Informe técnico.

23 Garcés, I. & Álvarez, G. (2020) Op. cit; Flexer, V., Baspineiro, C. & Galli, C.I. (2018). Op. cit.

su impacto en los ecosistemas frágiles de los salares. Frente a este panorama, es urgente establecer regulaciones ambientales específicas que consideren la complejidad y vulnerabilidad de los salares. La extracción de litio genera efectos acumulativos, especialmente sobre los sistemas hídricos, por lo que requiere un monitoreo ambiental permanente y transparente de parte de las empresas. Además, las comunidades vinculadas deben tener un rol activo en la potencial aprobación de los proyectos así como en la supervisión y evaluación de los impactos, aportando con sus conocimientos y experiencias en la protección de los ecosistemas.

3. Recomendaciones

La Estrategia Nacional del Litio promueve la implementación de la EDL bajo la premisa de que este método es más sustentable y susceptible de disminuir los eventuales impactos ambientales a los ecosistemas de salar. Sin embargo, persisten preocupaciones ambientales y sociales respecto a los mecanismos que aseguren información ambiental disponible, así como las instancias de participación política que conlleva este proceso de toma de decisiones públicas, como es el caso de las consultas indígenas y los procesos de participación pública. Así mismo, se observa que, ante la ausencia de experiencias industriales que implementen las tecnologías y métodos propuestos para los nuevos procesos extractivos de litio y sus subproductos, no ha existido una revisión de los marcos regulatorios de carácter ambiental, que otorgue directrices generales sobre los impactos de las decisiones de política pública.

En tal sentido, y en línea con lo expresado, se presentan un conjunto de lineamientos orientados a fortalecer la gobernanza sobre esta temática, que permita avanzar hacia tomas de decisiones que tengan en cuenta el resguardo de los territorios y ecosistemas afectados por la minería de litio:

3.1. Fortalecimiento de la investigación y desarrollo de sistemas de información ambiental

Es necesario fortalecer la investigación interdisciplinaria y territorialmente situada para apoyar los procesos de toma de decisiones institucionales y comunitarias sobre los impactos en territorios y ecosistemas afectados por la minería de litio en sus distintos estados y procesos. Esto debe ser previo a los impactos y garantizar la protección de los territorios vulnerables y la biodiversidad, de manera que se respeten garantías mínimas para el desarrollo de la información ambiental.

Asimismo, se requiere mayor investigación sobre dos cuestiones esenciales. Primero, líneas de base públicas tanto para la implementación de la red de salares protegidos como para el desarrollo de los proyectos en los salares declarados estratégicos y de aquellos que se han licitado públicamente. Luego, resulta indispensable contar con información sobre posibles impactos de la reinyección de salmueras residuales en los salares, debido a la ausencia de conocimiento disponible sobre modificaciones de cualidades físico-químicas de los cuerpos de agua que podrían causar daños irreversibles al ecosistema, incluyendo la microbiota subterránea. Se reconoce que aún no existen estudios que posibiliten una evaluación certera desde la mirada ecosistémica de las operaciones de EDL, incluso en pruebas piloto.

En dicho sentido, una alta expectativa genera el rol que pueda ocupar el Instituto Nacional de Litio y Salares en esta materia. Luego de su instalación, resulta indispensable el desarrollo de líneas de trabajo acordes con sus competencias para generar, validar y difundir datos hidrológicos, geoquímicos, de biodiversidad, así como información cualitativa de los socioecosistemas, de manera de garantizar la continuidad del observatorio más allá de los ciclos políticos de turno, y que haga posible una toma de decisiones públicas basadas en evidencia.

Asimismo, y en función de dar cumplimiento a lo dispuesto en el Acuerdo de Escazú en sus artículos 5 y 6, resulta de alta relevancia y viabilidad implementar un portal de carácter público de información ambiental de acceso libre, interoperable y actualizado en tiempo real, que contenga información georreferenciada, así como datos de series históricas de niveles freáticos, salinidades, consumos de agua, entre otros elementos, tanto relativo a procesos actuales y futuros de explotación de litio, para uso de tomadores de decisión, academia y ciudadanía.

3.2. Fortalecimiento de la evaluación ambiental y la participación pública

La creciente demanda de litio y el discurso sobre nuevas tecnologías como la EDL, se observan como estrategias de legitimación que, de no estar acompañada de mejoras en los estándares normativos de la actividad minera, quedará en un discurso vacío o contradictorio. Es urgente establecer regulaciones ambientales específicas que aborden la escala de la intervención que se proyecta, así como la complejidad y vulnerabilidad de los ecosistemas de salares, que doten al sistema de la capacidad de abordar la toma de decisiones desde la evidencia, pero también a partir del fortalecimiento de la democracia ambiental, de manera de se incorpore la equidad intergeneracional, justicia socioambiental y la pertinencia territorial.

En tal sentido, se requiere un fortalecimiento de la evaluación de impacto ambiental, de manera que sea capaz de abordar la intervención del ambiente de manera integral, sinérgica y acumulativa, que considere la complejidad histórica y ambiental de los territorios en donde se esperan instalar las diversas actividades extractivas. Dichos territorios y cuencas, cuentan con habitantes (humanos y no-humanos) que deben ser considerados en los procesos de toma de decisión, pudiendo identificar realmente las consecuencias que tendrá para los distintos sistemas de vida, la profundización de la minería del litio. Para lo anterior, es indispensable que se aseguren los mecanismos de participación informada, ya sea por medio de la implementación de las respectivas consultas indígenas bajo los estándares del Convenio de la OIT 169, así como la implementación de procesos de participación ciudadana en materia ambiental, tanto de las políticas públicas como de los proyectos individualmente considerados.

Es esencial, para una correcta implementación de cualquier forma de explotación, evaluar el impacto ambiental desde la etapa de diseño de políticas públicas, pasando por el desarrollo de infraestructura hasta la obtención del producto final de litio sólido y la disposición para exportación en los puertos, así como el cierre de dichos proyectos y el estado en que esos territorios serán “desocupados” por la actividad industrial. Esto, debe estar acompañado de un monitoreo ambiental permanente y transparente, especialmente sobre los sistemas hídricos y sus interacciones con otros componentes ambientales.

Así también, se requiere de protocolos estandarizados de distintas materias como la caracterización previa (hidrológica, geoquímica y geomecánica) según cada método de explotación (adsorción, intercambio iónico, membranas). Además los criterios de factibilidad social y económica, como la viabilidad ambiental de los proyectos, debe contemplar

la generación y calidad de la información ambiental, que incluyan planes de monitoreo y contingencia específicos, su efectiva divulgación, así como la adaptación de los elementos de cada proyecto a la evidencia empírica de los impactos que los proyectos generan.

Las comunidades vinculadas a estos ecosistemas deben tener un rol activo en la evaluación de los proyectos, pasando de considerarlos como meros observadores a portadores de un conocimiento indispensable para la toma de decisiones. Esta recomendación podría generar la posibilidad de que aporten sus conocimientos sobre el territorio y experiencia en funcionamiento de los ecosistemas y los sistemas de vida asociados, además de acceder a la información de monitoreos en caso de ser aprobados los proyectos en particular. Es crucial asegurar que la expansión minera en territorios sensibles no comprometa los derechos de las comunidades locales, especialmente de los pueblos indígenas, ni su relación con los componentes ambientales presentes en los territorios indígenas, como el caso del acceso al agua.





Fotografía: Aline Juárez.

3.3. La crucial preocupación por el resguardo de los ecosistemas hídricos

Las tecnologías de EDL deben ejercer un uso racional y sustentable del agua en las cuencas. A pesar de que la EDL consume menos agua que los métodos tradicionales, todavía requiere agua dulce y energía. La reinyección de salmueras agotadas, aunque prometedora para mitigar la caída de niveles freáticos, puede alterar la geoquímica del salar y afectar el equilibrio hidrológico.

La gestión de residuos debe ser abordada, incluyendo la salmuera residual, el agua contaminada por procesos de lavado y los residuos sólidos como precipitados o membranas gastadas, pues un mal manejo puede alterar el balance hídrico y químico de los salares.

Aquí proponemos la creación de modelos hidrogeológicos independientes que permitan insumar el proceso de toma de decisiones, que haga posible una gestión adecuada de las aguas, considerando las particularidades de cada salar y las interacciones entre aguas-comunidades-biodiversidad y procesos de extracción. En este caso, la colaboración con universidades, centros de investigación y organizaciones de sociedad civil puede proporcionar datos y análisis esenciales para una toma de decisiones informada, generando ciencia al servicio de la población y sus territorios.

Tabla 1. Cuadro comparativo con las condiciones, ventajas y desventajas de los métodos de extracción de litio desde un punto de vista de procesos²⁴. Elaboración propia.

Condiciones	Métodos de Evaporación	Métodos de Extracción Directa (EDL)
Tasa de evaporación y precipitación	<ul style="list-style-type: none"> Alta tasa de evaporación reduce la duración del proceso En zonas con alta precipitación y baja evaporación, el proceso no es rentable y se prolonga. 	<ul style="list-style-type: none"> No depende del clima, por lo que se puede implementar en diferentes condiciones ambientales.
Concentración de litio en la salmuera	<ul style="list-style-type: none"> Alta concentración de litio (2100 ppm en el Salar de Atacama). Mejora la eficiencia. Bajas concentraciones que requieren más tiempo y recursos, elevando los costos. 	<ul style="list-style-type: none"> Eficaz para salmueras con bajas concentraciones de litio. Aún experimental y no completamente viable en condiciones industriales.
Relación Mg²⁺/Li⁺	<ul style="list-style-type: none"> Favorece la formación de cloruro de litio y reduce los costos. Altas concentraciones de magnesio que incrementan el consumo de reactivos y dificultan el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> Las tecnologías EDL pueden separar eficientemente el litio, incluso en presencia de altos niveles de magnesio.

24 Garcés, I. & Álvarez, G. (2020) Water mining and extractivism of the Salar de Atacama, Chile. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 245, 189-199. DOI: 10.2495/EID200181

Duración del proceso	<ul style="list-style-type: none">• En condiciones óptimas, el proceso dura entre 12-14 meses.• Puede tardar hasta 18 meses en zonas no óptimas.	<ul style="list-style-type: none">• Proceso rápido (horas o días) en comparación con la evaporación.
Impacto ambiental	<ul style="list-style-type: none">• Alto consumo de agua, genera residuos salinos y afecta a los ecosistemas locales.	<ul style="list-style-type: none">• Menor consumo de agua, menor generación de desechos.• Los efectos a largo plazo de la reinyección de salmueras aún no están completamente estudiados.
Costo	<ul style="list-style-type: none">• Bajos costos operativos en zonas adecuadas.• Alto costo en áreas no óptimas debido a la larga duración del proceso.	<ul style="list-style-type: none">• Potencial para reducir costos operativos en el futuro.• Altos costos iniciales de inversión y operación en la actualidad.
Dependencia climática	<ul style="list-style-type: none">• Depende de la tasa de evaporación y las condiciones climáticas locales.	<ul style="list-style-type: none">• No depende del clima, se puede implementar en diversas zonas.



Tabla 2. Efectividad de los diferentes métodos de extracción directa de litio. Fuente: Tomado de Garcés, 2017; Torres et al., 2020; Kelly et al, 2021; Murphy and Haji, 2022; Calvo, 2022.

Tecnología	Descripción	% recuperación de litio
Adsorbentes	Proceso de adsorción usando sorbentes.	80 – 99.9
Intercambio iónico	Intercambio iónico por medio de resinas, aluminatos o cerámicas.	80 – 99.9
Extracción por solvente	Mezcla de fluido solvente con salmuera para extraer agua.	99.9
Separación por membrana	Uso en conjunción con intercambio iónico y adsorbentes/ extracción por solvente; procesos prometedores son absorción o intercalación.	>99
Separación electroquímica	Extracción electroquímica de litio de salmueras por adsorción.	>90

Tabla 3. Comparación de los métodos de extracción de litio. Fuente: Modificado de Goldman Sachs Global Investment Research, 2023 y Otras fuentes: Kelly et al, 2021; Murphy and Haji, 2022; Calvo, 2022.

Métodos de extracción	Mineral de Roca	Minería con salmueras	
	Minería tradicional	Evaporación	Extracción directa de Litio
Recuperación de Li	~60-80% (processing)	~40-60%	~70-90%
Duración del proceso	Semanas a meses	11-18 meses	Horas - días
Proceso	espodumeno (~5-6% Li ₂ O)	Carbonato de Li, cloruro de litio, hidróxido de litio	Carbonato Litio (Li ₂ CO ₃) / Cloruro Litio (LiCl)
Costos	Medio - alto	Bajo	Medio
Inversión	Variado en grado/ conversión química	~US\$23-34,000/ tpa LCE	~US\$26-34,000/ tpa LCE
Gastos de funcionamiento		~ US \$ 3,300 - 4,900/t LCE	~ US \$ 2,800 - 3,600/t LCE
Otros requisitos de tratamiento	Si	No	No
Requisitos de superficie	Alto	Bajo	Bajo
Dependencia climática	Si	Si	No

Consumo de agua	Alto	Medio - alto	Bajo – medio (sujeto a disponibilidad de reinyecciones)
Consumo de energía	Alto	Bajo (consume energía del sol)	Medio
Emisiones	Alto	Bajo	Bajo
Impactos ambientales	Alto	Medio	Bajo
Tasas de evaporación	Independiente	Sin requisito	Moderada a bajas
Factores de concentración	Método aplicable con cualquier ley de mineral	No es económica para salmueras con concentraciones inferiores a 30 ppm	Es más rentable para salmueras de bajas concentraciones. Se aplica en salmuera geotérmica natural



Fotografía: Ramón Balcazar

Revisa los enlaces en la versión digital:



www.humedalesandinos.org



ALIANZA
HUMEDALES
ANDINOS



Fotografía: Javiera Pérez Santos.