

ANÁLISIS TÉCNICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DIRECTA DE LITIO PARA LA SALMUERAS DEL SALAR DE COIPASA: COMPARACIÓN ENTRE ABSORCIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO

¹ Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.

² M. Sc. Ing. Jorge Gutierrez V.

³ Dr.- Ing. Ruth Meza D.

1 Docente - Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro

2 Docente – Carrera de Geología - Universidad Técnica de Oruro

3 Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica – Universidad Nacional del Altiplano

gerardozamoraechenique@yahoo.es

fni.jorge@gmail.com

rmeza@unap.edu.pe

RESUMEN

En el altiplano boliviano, se encuentra el Salar de Coipasa (68°8'W, 19°23'S), considerado como el segundo salar más grande en Bolivia (2,500 km², 3,656 m.s.n.m.), ubicado al noroeste del Salar de Uyuni. El salar de Coipasa tiene mayor significancia como recurso estratégico de desarrollo para el departamento de Oruro en Bolivia.

El presente trabajo de investigación se circunscribe al análisis de los métodos de Extracción Directa de Litio (EDL, por sus siglas en inglés DLE) aplicables a la salmuera del Salar de Coipasa, con un enfoque a dos tecnologías emergentes: **absorción** mediante sorbentes (adsorbentes) e **intercambio iónico** con resinas o sorbentes iónicos. Se examinan los fundamentos teóricos, la viabilidad operativa, los desafíos técnicos, económicos, ambientales, energéticos y de calidad de pureza del producto final de Litio obtenido, así como la factibilidad para su implementación en Coipasa, considerando las características geoquímicas de la salmuera. Se propone una metodología para ensayos piloto, se evalúan posibles resultados y, finalmente, se discuten las ventajas relativas de cada método en el contexto local.

Palabras Clave: Salar de Coipasa - Extracción Directa de litio de salmueras – EDL de salmueras de Coipasa.

ABSTRACT

In the Bolivian Altiplano lies the Coipasa Salt Flat (68°8'W, 19°23'S), considered the second largest salt flat in Bolivia (2,500 km², 3,656 m.a.s.l.) and located northwest of the Uyuni Salt Flat. The Coipasa Salt Flat holds major significance as a strategic development resource for the Department of Oruro in Bolivia.

This research study focuses on the analysis of Direct Lithium Extraction (DLE) methods applicable to the brine of the Coipasa Salt Flat, with emphasis on two emerging technologies: lithium absorption using sorbents (adsorbents) and ion-exchange processes employing resins or ionic sorbents. The study examines the theoretical foundations, operational feasibility, and the technical, economic, environmental, social, and energy-related challenges, as well as issues related to the purity of the final lithium product. It also assesses the feasibility of implementing these methods in Coipasa, taking into account the geochemical characteristics of the brine. A methodology for pilot testing is proposed, potential outcomes are evaluated, and the relative advantages of each method are discussed within the local context.

Keywords: Coipasa Salt Flat – Direct Lithium Extraction from brines – DLE for Coipasa brines.

1. Introducción

Los salares más importantes de Bolivia son el Salar de Uyuni (10,000 km², 3,653 m.s.n.m.) y el Salar de Coipasa (2,500 km², 3,656 m.s.n.m.). El Salar de Coipasa (68°8'W, 19°23'S), es el segundo salar más grande del Altiplano boliviano, que es una cuenca inter montaña internamente drenada (187,000 km²) ubicada en el sur de los Andes tropicales.

El Salar de Coipasa se encuentra al noroeste del Salar de Uyuni, y juntos forman la última cuenca terminal del Altiplano (Fig. 1), recibiendo agua del Altiplano norte durante los períodos pasados de desbordamiento del Lago Titicaca y el Lago Poopó (J. Andrew Nunnery et al.).

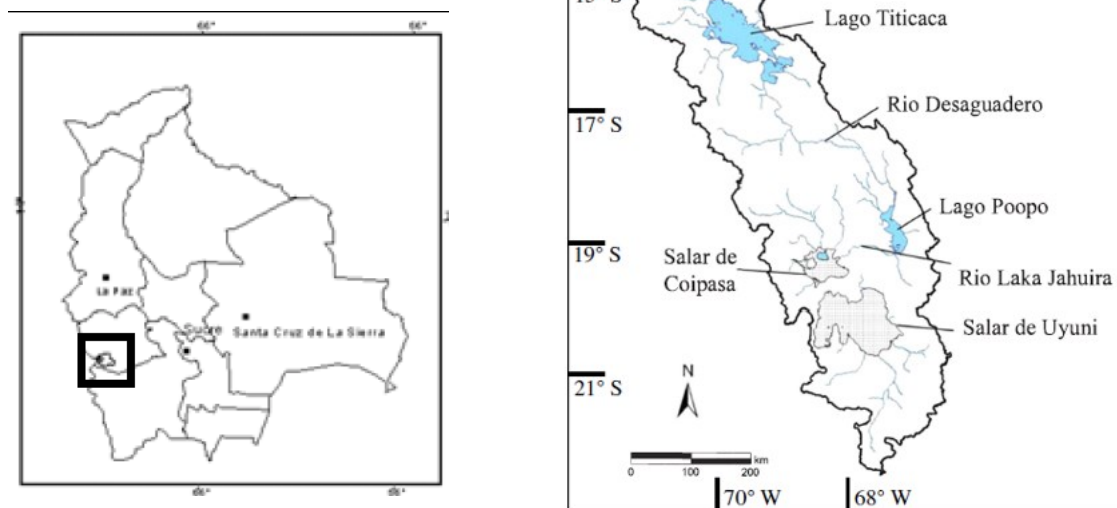


Figura 1.- Localización del salar de Coipasa

La cuenca del Salar de Coipasa está llena de depósitos aluviales, volcánicos y evaporíticos de edad Terciaria tardía a Cuaternaria (Ericksen et al., 1978; Risacher y Fritz, 1991; Clapperton, 1993; Sylvestre et al., 1998; Banks et al., 2004) y está cubierta por una costra de sal que tiene un espesor de 2.5 m cerca de su centro y se estrecha a <0.5 m en el margen del salar (Risacher y Fritz, 1991). Los principales tributarios del salar de Coipasa, aparte del

Río Lauca, son el Río Sabaya al Norte, el Río Laca Jahuira al Este y el Río Moscoma al Sud. Una descripción general dada por (Risacher, 1992) establece que, la costra de sal de Coipasa nunca supera los 2,5 m y está hecho de halita porosa que pasa hacia cada vez más mirabilita más abundante ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) en la base. El perfil de la costra salina del salar de Coipasa puede ser representada como se muestra en la figura 2.

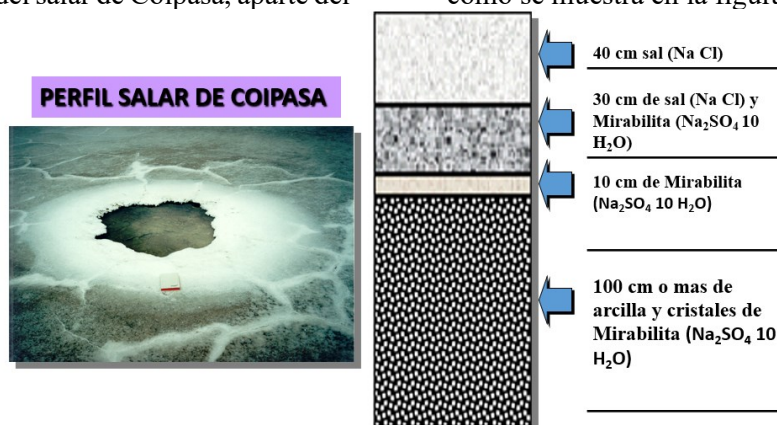


Figura 2.- Perfil de la costra salina del salar de Coipasa

El salar de Coipasa tiene mayor significancia como recurso estratégico para el departamento de Oruro en Bolivia. Se encuentra mayormente (99%) en territorio nacional, penetrando en menor parte la

frontera con Chile del lado de la comuna de Colchane, Región de Tarapacá (1%) (Sanjines, 2022). La figura siguiente, muestra una vista satelital del Salar de Coipasa.



Figura 3.- Vista Satelital del Salar de Coipasa. (Google Earth - 2024)

En el marco de la Federal Direction for International Cooperation (DGCI) (1996-2000), la Universidad de Liege y la Universidad Técnica de Oruro, han efectuado una prospección del Salar de Coipasa sistemática con una malla de 2 por 2 km superpuesta a la corteza salina que ha permitido la recolección de

muestras de salmueras superficiales rompiendo la costra salina con una barra de hierro hasta alcanzar el nivel de la capa de salmuera (de 5 a 20 cm por debajo de la costra salina, como se muestra en la figura siguiente:

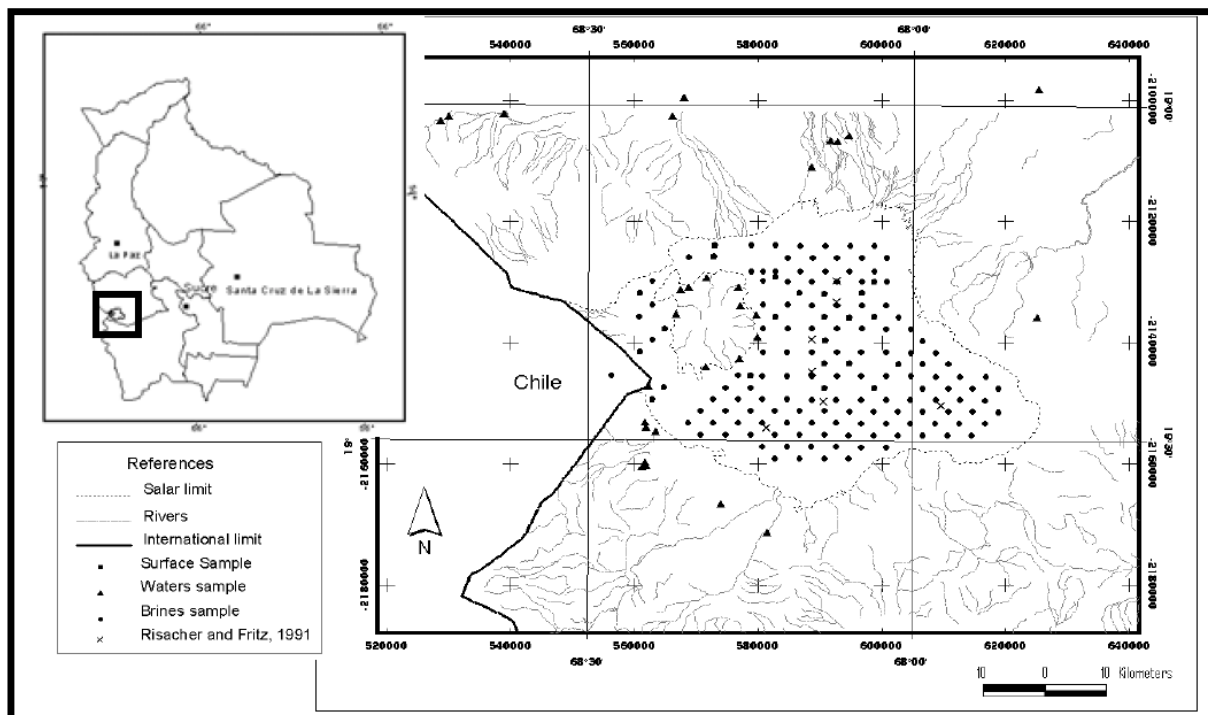


Figura 4.- Localización del Salar de Coipasa en la frontera con Chile y ubicación de las muestras en la corteza salina (V. Lebrun et al., 1997)

El enriquecimiento de las salmueras en las zonas de desembocadura de los ríos, y su empobrecimiento en la parte occidental de la costra salina; el relativamente bajo gradiente de concentración en las salmueras; la mayor relación Mg/Li y concentración de sulfatos de Coipasa en comparación con Uyuni han sido determinados en dicho estudio (V. Lebrun et al., 1997).

La tabla siguiente, muestra los resultados de los análisis de 220 muestras de salmueras del Salar de Coipasa (V. Lebrun et al., 1997). Se presenta, además, a manera de comparativo, los resultados estadísticos de las salmueras de Uyuni que fueron seleccionadas de la serie U de Risacher y Fritz (1991) después de eliminar las salmueras profundas y los sedimentos deltaicos.

Coipasa (220 Salmueras – mg/lit) Proyecto Coipasa 1997

	Mg	K	Li	Ca	Na	SO ₄	Cl
Mínimo	1131.3	2588.1	56.9	29.4	60162.3	1739.5	64350
Máximo	39205.6	23493.6	988	3665.1	121024.7	66706.1	204000
Media	14494.7	9306.1	339.1	1506.8	99213.9	28193.2	186049.2

Uyuni (36 salmueras – mg/lit) Risacher & Fritz (1991)

	Mg	K	Li	Ca	Na	SO ₄	Cl
Media	12806.1	11378.1	289.8	561.4	97957	13838.4	192836

Tabla 1.- Datos estadísticos de las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las salmueras de Coipasa y Uyuni (V. Lebrun et al., 1997 y Risacher y Fritz, 1991)

De los resultados de los análisis químicos de las salmueras arriba mencionadas se deduce que las salmueras de Uyuni tienen un contenido de Li notablemente más alto; pero los contenidos de K son relativamente similares, y menores los de Mg, en comparación con Coipasa. Las elevadas

concentraciones de sulfato del río Lauca hacen que el contenido de sulfato de Coipasa sea de aproximadamente tres veces mayor que el de Uyuni. Las curvas de isoconcentración para la distribución espacial del Litio se determinaron mediante un algoritmo de distancia cuadrática inversa (Figura 5).

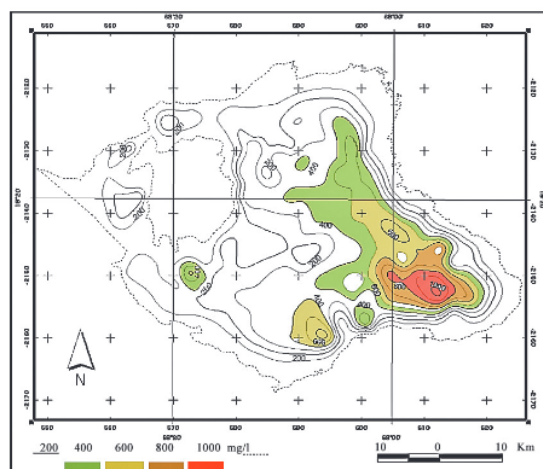
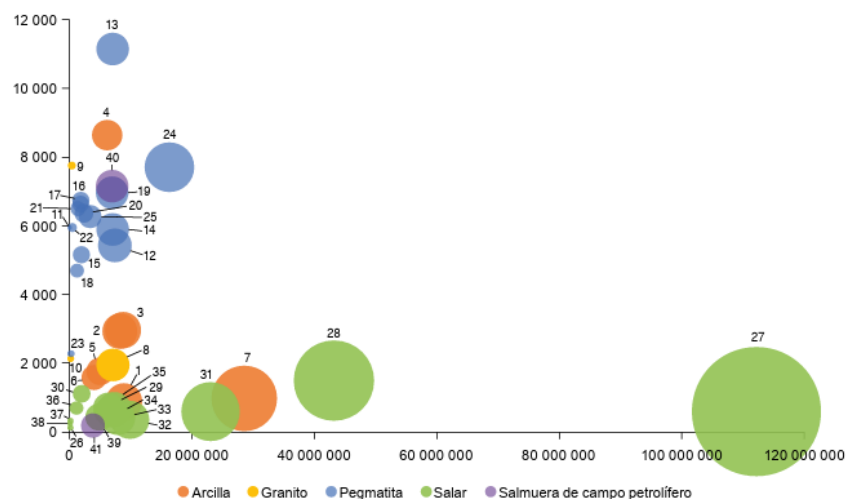


Figura 5.- Curvas de isoconcentraciones de Li en el Salar de Coipasa (V. Lebrun et al., 1997)

Las concentraciones más bajas se encuentran al oeste de la isla volcánica de Coipasa. Esta región es también la más seca, ya que no recibe mucha agua de los ríos afluentes. Por el contrario, la parte oriental del salar es la más concentrada y el gradiente aumenta al acercarse al lago permanente alimentado por el río Lauca al norte y por el río Laca Jauira al este.

2.- Bases técnicas para la recuperación de Litio de Salmueras de Coipasa por métodos de extracción directa

La figura siguiente, muestra la relación ley-tonelaje de los principales tipos de depósitos de litio (En ppm); en especial, y en círculos en verde, el litio en salares (no se presenta información sobre el Salar de Coipasa):



Fuente: Elaboración propia sobre la base de reportes públicos de empresas operadoras de los proyectos y publicaciones del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

* 1, Clayton Valley (USA); 2, Sonora (MEX); 3, Thacker Pass (USA); 4, Jadar (SRB); 5, Falchani (PER); 6, Rhyolite Ridge (USA); 7, Bonnie Claire (USA); 8, Cinovec (CZE); 9, Keliber (FIN); 10, Sadisdorf (GER); 11, Tanco (CAN); 12, Wodgina (AUS); 13, Greenbushes (AUS); 14, Pilgangoora (AUS); 15, Arcadia (ZWE); 16, Whabouchi (CAN); 17, Grota do Cirilo (BRA); 18, Pilgangoora (AUS); 19, Mt Holland-Lithium (AUS); 20, Mount Marion (AUS); 21, James Bay (CAN); 22, Mt Cattlin (AUS); 23, Mibra (BRA); 24, Manono (COD); 25, Goulamina (MLI); 26, Clayton Valley South (USA); 27, Uyuni (BOL); 28, Atacama (CHL); 29, Zhabuye (CHN); 30, Maricunga (CHL); 31, Cauchari-Olaroz (ARG); 32, Centenario-Ratones (ARG); 33, Salar del Rincón (ARG); 34, Tres Quebradas (ARG); 35, Salar de Olaroz (ARG); 36, Salar del Hombre Muerto (ARG); 37, Rincón (ARG); 38, Silver Peak (USA); 39, Pastos Grandes (ARG); 40, Alberta (CAN); 41, Tetra (USA).

Figura 6.- Relación ley-tonelaje de los principales tipos de depósitos de litio (En ppm)

Fuente: CEPAL - El litio, un recurso estratégico (2023)

Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), resultado de trabajos de exploración que la empresa estatal retomó a partir del año 2021 con la perforación de 66 pozos en ambos salares, se cuantificó más de 2 millones de toneladas de litio: 1,8 millones de toneladas en el salar de Coipasa y 200 mil toneladas, en el salar de Pastos Grandes (Memoria institucional YLB – 2020) En las figuras siguientes, se muestran las gráficas referidas a las relaciones de concentraciones Mg/Li y SO_4/Li presentes en las salmueras de los diferentes salares de interés global.

Para el caso de del Salar de Coipasa, la relación de Mg/Li es de 42.74 (28193.2 mg/L de $SO_4/339.1$ mg/L de Li); además, la relación de SO_4/Li es de 83.14 (28193.2 mg/L de SO_4 y 339.1 mg/L de Li).

Desde el punto de vista tecnológico, y considerando las operaciones exitosas de extracción y obtención de $LiCO_3$ en la operación de Ambermale - Atacama - Chile, por el proceso convencional de enriquecimiento en Li de la salmuera por evaporación-cristalización en pozas como primera etapa, y luego, la separación de impurezas por extracción por solventes, para la eliminación del B, y la precipitación iónica, para la eliminación del Mg y Ca; y finalmente, la etapa de recuperación del $LiCO_3$, también por precipitación iónica a mayor temperatura, se parte de una salmuera cuyas relaciones de Mg/Li y SO_4/Li son de 6.0 y 6.3 (De las figuras 7 y 8, respectivamente), pero pese a presentar esos valores relativamente bajos,

solamente se alcanzan recuperaciones finales de 41% mediante el proceso convencional de extracción de litio de las salmueras (Figura 9), debido al arrastre del litio en los productos de cristalización y precipitación.

Se debe tomar en cuenta además que, la concentración de litio en la salmuera, la tasa de evaporación que depende de la altitud y el clima local, además, las condiciones como el clima, la hidrogeología de las pozas, la permeabilidad, las reservas, la infraestructura (electricidad y accesibilidad) y la disponibilidad de agua dulce son factores que deben ser considerados para la factibilidad técnica-económica de la explotación por procesos convencionales de las salmueras de un salar.

Los salares que tienden a ser más competitivos en su explotación, son aquellos que presentan una alta concentración de litio en la salmuera, y a la vez que contengan, bajas relaciones de magnesio – litio y sulfato – litio; además que, en el sitio de operación se tenga una elevada tasa de evaporación y bajas precipitaciones pluviales. Es decir, la explotación de litio de los salares bolivianos, hacen difícil la posibilidad de extracción a través de procesos convencionales. La figura siguiente muestra el flujograma del proceso de extracción de $LiCO_3$ de Ambermarle – Chile.

- a- Si las depresiones se producen en el núcleo del salar, el agua dulce migrará desde los abanicos hacia estos sectores y se salinizará.
b- Si el bombeo se produce sobre las reservas de agua dulce de los abanicos, la dinámica de la zona de

mezcla puede verse afectada y se producirá la invasión de agua salada desde el núcleo hacia los abanicos. Este daño es irreversible ya que los sedimentos quedarán impregnados de sal lo que contaminaría las nuevas recargas.

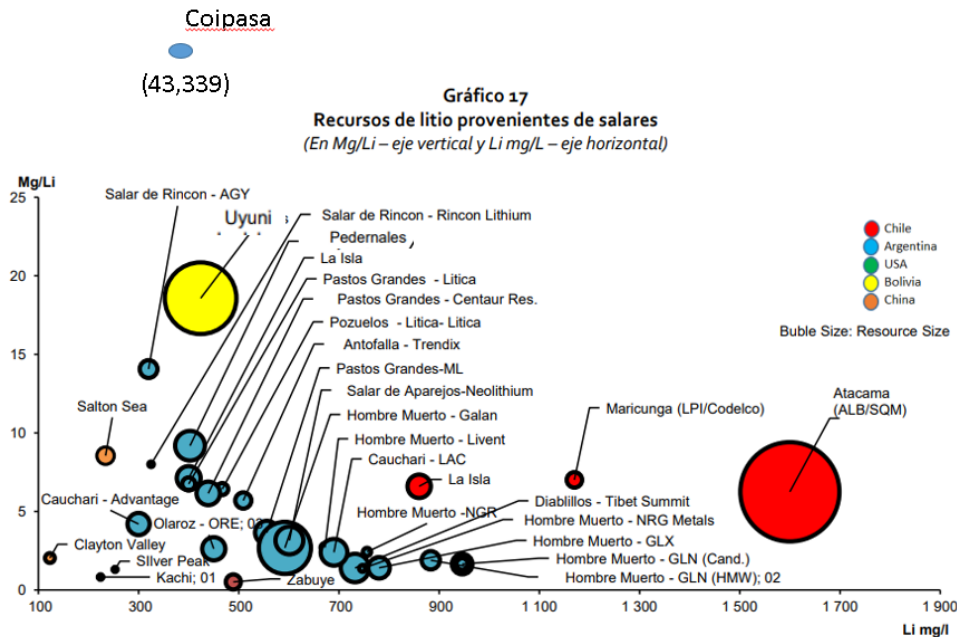


Figura 7.- Relación de concentraciones de Mg/Li vs concentración de Litio presente en salares de interés global. D. Jiménez (2022)

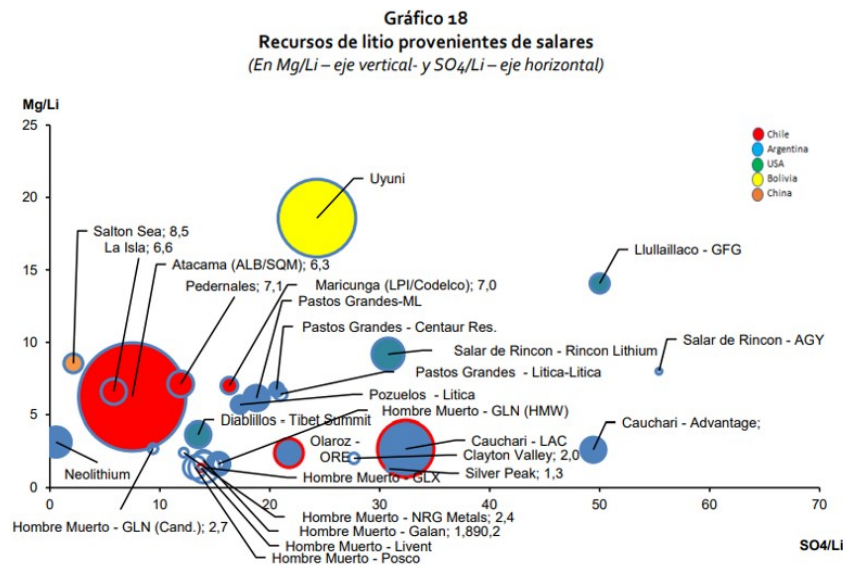


Figura 8.- Relación de concentraciones de Mg/Li vs SO₄/Li presentes en salares de interés global. D. Jiménez (2022)

El proceso de producción de LiCO₃ requiere de 23.5 L/s de agua para tratar una tasa de extracción de 450 L/salmueras (Ambermale Corporation, 2020). Sin embargo, en promedio, se han reportado volúmenes de agua evaporada en las piscinas de evaporación que van de 500 a 1000 m³ por tonelada de LiCO₃

producido. La figura 10, muestra los consumos de agua requeridos para la producción de diferentes metales con usos importantes en baterías de ion Litio y en tecnologías limpias; que coinciden con el máximo de 1000 m³/tonelada de LiCO₃ producido.

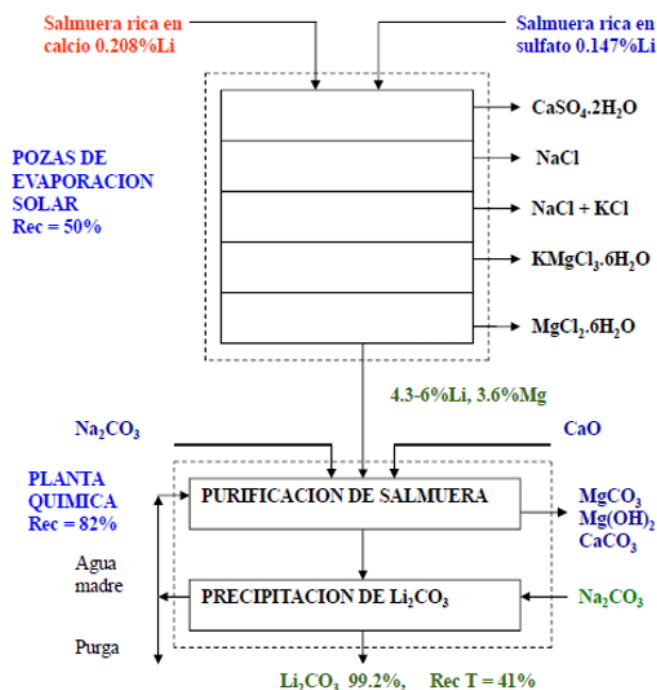


Figura 9.- Flujograma de tratamiento de las salmueras en Ambermarle

Es decir, que si bien la etapa de exploración, que es la menos invasiva, las alteraciones son simplemente temporarias y los impactos suelen ser transitorios y controlados, la etapa de explotación y producción de LiCO_3 se pueden distinguir 3 tipos de impactos:

- Impacto de los pozos de extracción de salmueras: cuando se bombea agua desde un pozo se produce un cono de depresión en el acuífero cuyas dimensiones dependen del material usado y caudal de bombeo. Si se bombea desde pozos cercanos y los conos

se superponen, el efecto de la depresión es mucho mayor, generando una alteración en el flujo de aguas subterráneas.

- Salinización del agua dulce: este efecto puede producirse de dos formas distintas, dependiendo de dónde se ubique el pozo de bombeo:
- Disminución o cese de evaporación: un descenso excesivo de los niveles freáticos puede provocar que la evaporación desde la superficie freática cese.

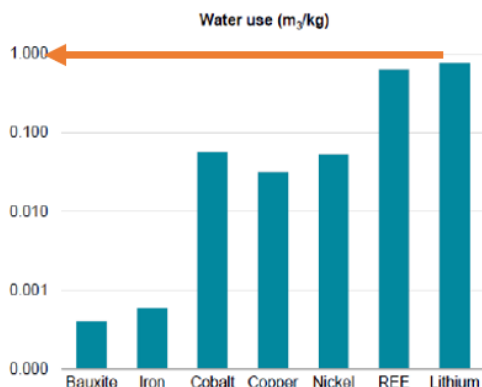


Figura 10.- Consumos de agua requeridos en los procesos de extracción de diferentes metales (Farjana, 2019)

3.- Bases teóricas para la elección de la propuesta de extracción directa de litio pro absorción e intercambio iónico

La figura 11, muestra un análisis comparativo de las posibles alternativas de extracción directa de Li de las salmueras y su comparación con el proceso convencional de uso de piscinas de evaporación.

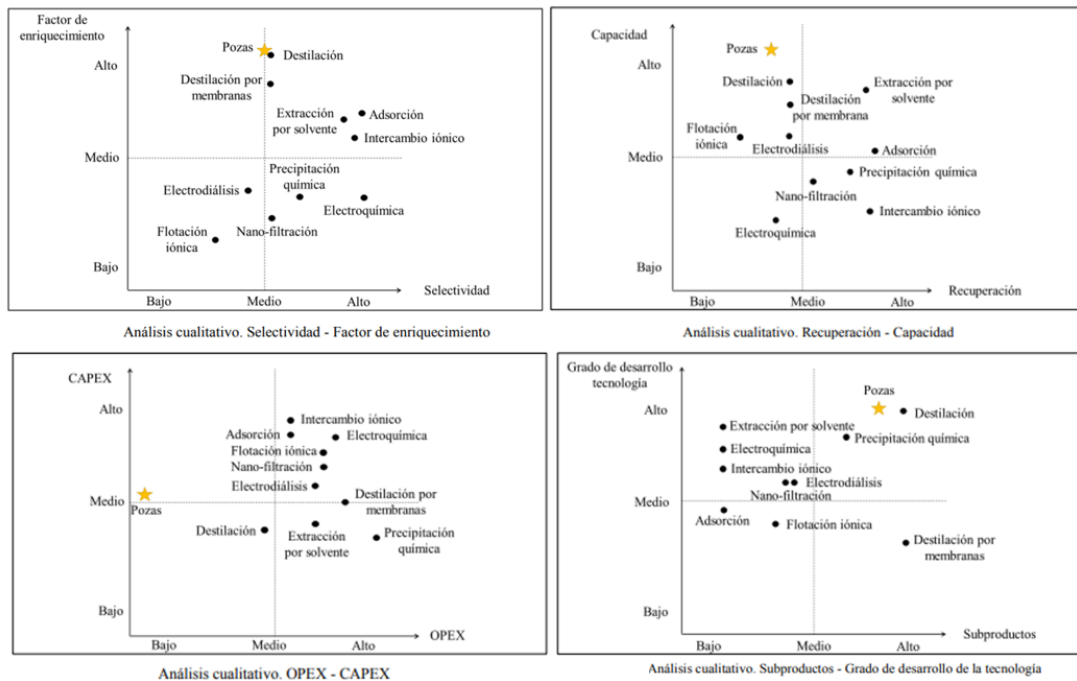


Figura 11.- Análisis cualitativo comparativo de posibles alternativas de extracción directa de Li de las salmueras y su comparación con el proceso de piscinas de evaporación. M. Lee Yin. (2022).

De las gráficas anteriores se establece que la obtención de LiCO_3 utilizando las piscinas de evaporación como principal método de enriquecimiento de Li de las salmueras, permite un alto grado de enriquecimiento, una alta capacidad de tratamiento, costos de inversión medios, y un grado de desarrollo tecnológico alto; por el contrario, las nuevas tecnologías de extracción directa de Litio, como la extracción por solventes, la adsorción y el intercambio iónico, presentan actores de enriquecimiento entre medio y alto, menores capacidades de producción que las pozas; mayores costos de inversión y procesos que a la fecha han sido desarrollados industrialmente para el enriquecimiento de otros metales de interés económico.

En el contexto arriba descrito y desde el punto de vista competitivo, las tecnologías de extracción directa de Litio de salmueras que hoy buscan situarse en el mercado de la producción son la adsorción, el intercambio iónico y la extracción por solventes.

Por otra parte, las elevadas relaciones de Mg/Li y SO_4/Li de las salmueras del Salar del Coipasa (42.74 y 83.14 respectivamente), hacen pensar que los procesos convencionales de extracción pueden ser técnicamente inviables y darían lugar a obtener muy bajas recuperaciones de Litio, por el análisis realizado en el acápite anterior

La figura siguiente, muestra las tasas de evaporación y concentración de litio en salmueras de diferentes depósitos a nivel mundial (En pmm y mm/año, respectivamente).

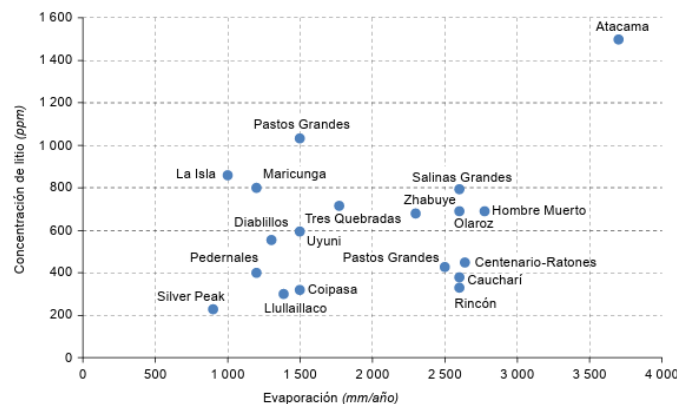


Figura 12.- Tasas de evaporación y concentración de litio en salmueras de diferentes depósitos a nivel mundial (En pmm y mm/año, respectivamente) (Cepal, 2023)

La precipitación media anual en el Salar de Coipasa es hasta de 1500 mm/año.

La figura 13, muestra el área requerida por las piscinas de evaporación-cristalización para producciones por encima de las 10 ktpa de LiCO_3 que

ha sido construida a partir de los datos técnicos de las plantas industriales que operan a nivel global, considerando además el valor promedio de las concentraciones de litio que presentan las salmueras tratadas.

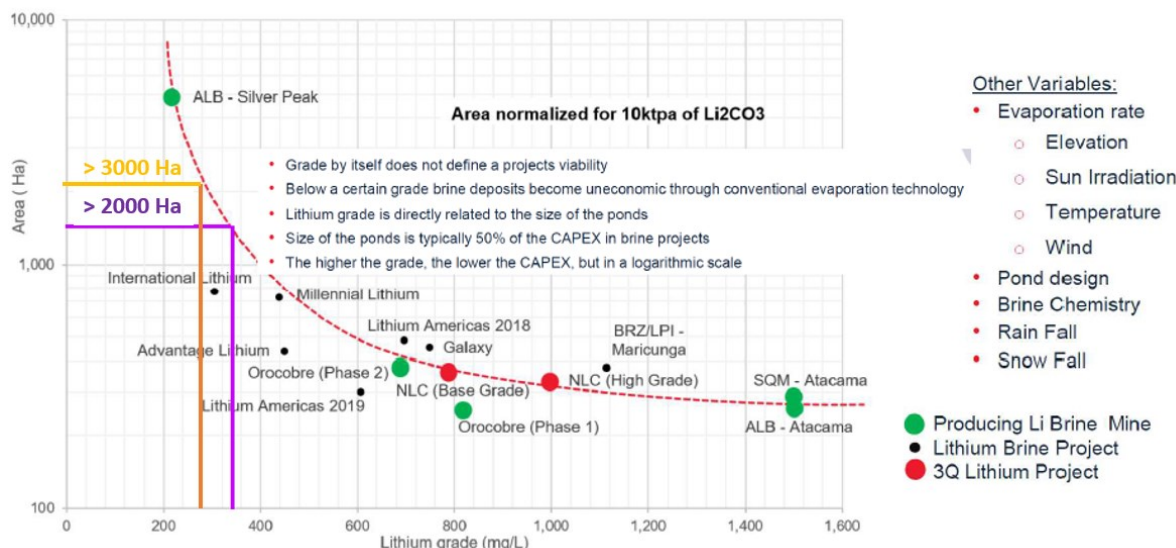


Figura 13.- Área requerida estimada en piscinas de evaporación-cristalización que se encuentran en operación (3Q, presentación)

El trazo de la línea en anaranjada, muestra que el área estimada requerida para tratar la salmuera de Coipasa, considerando condiciones mucho más desfavorables que las que se tendrían en dicho salar que presenta menor contenido de litio en las salmueras, tasas de evaporación menores y mayor precipitación fluvial que en las operaciones de extracción en los sitios donde presentados en el gráfico, sobrepasaría las 3000 Has.

El trazo de la línea lila, correspondería para el caso de Uyuni. (Como ejemplo, en Atacama se tiene una evaporación de 3200 mm/año y una pluviometría de 10 a 15 mm/año; mientras que en Uyuni son de 1500 mm/año y 200-500 mm/año).

Por otra parte, la figura siguiente muestra un comparativo de los costos de procesamiento basado en las experiencias de la explotación de salares.

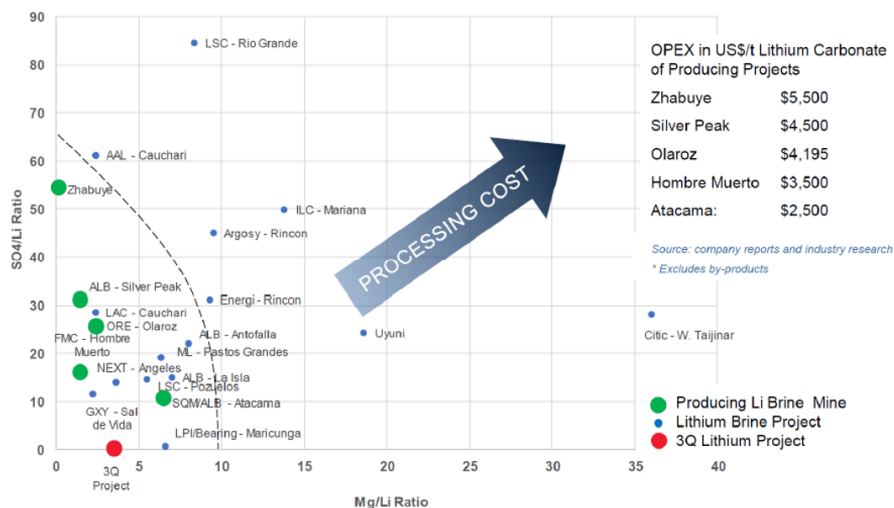


Figura 14.- Costos comparativos del procesamiento de salmueras basado en las experiencias de la explotación 3Q, presentación

De la figura anterior es posible colegir que cuanto mayor sea la relación de Mg/Li y SO_4/Li , como es el

caso de las salmueras de Coipasa, los costos de procesamiento de salmueras son mayores.

En el contexto arriba descrito, y considerando los siguientes aspectos técnicos justificados en las bases teóricas expuestas como la baja concentración de litio en la salmuera, tasas de evaporación menores y precipitaciones pluviales mucho mayores a las de Atacama, poca o ninguna disponibilidad de agua dulce, altas relaciones de Mg/Li y SO₄/Li en la salmuera, dictaminar como de “difícil la posibilidad de extracción de litio de las salmueras de Coipasa a través de procesos convencionales”. Es decir, la extracción de litio del salar de Coipasa debe efectuarse por el método de extracción directa, considerando como ventajas competitivas que:

- Son más selectivas en la remoción del litio presente en las salmueras (mayor eficiencia).

- Son más rápidas en la extracción del litio de las salmueras (rápida extracción).
- Se alcanzan altas extracciones de litio en todo el proceso (altas recuperaciones).
- Se consideran costos competitivos y posibles de escalonamiento (costos competitivos)
- Son amigables con el medio ambiente, considerando que la salmuera residual, después de la extracción directa, puede ser reinyectada al salar (menor huella hídrica)

Con respecto a esta última ventaja competitiva, quizá la de mayor incidencia competitiva, se presenta la figura siguiente, en la que es posible apreciar el efecto de la disminución del nivel freático en un proceso convencional y en un proceso de extracción directa de litio de salmueras.

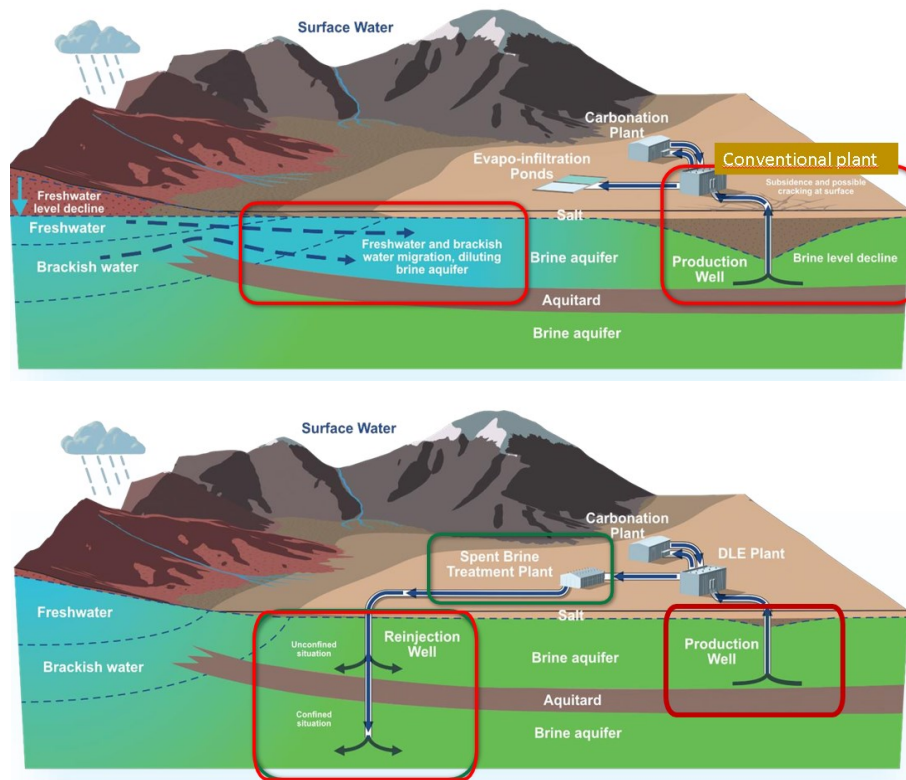


Figura 15.- Efecto de la disminución del nivel freático en un proceso convencional y en un proceso de extracción directa de litio de salmueras (Halkes, 2024)

4.- Análisis técnico, económico y ambiental de la aplicación de métodos de extracción directa de litio en el Salar de Coipasa por Adsorción e Intercambio Iónico

Los proyectos de estanques de evaporación enfrentan numerosos desafíos técnicos y ambientales que les han impedido desempeñar un papel importante en el crecimiento de la oferta

durante la última década:

- ✓ Huella hídrica: Los proyectos requieren vastas áreas de terreno para alcanzar tasas de producción de importancia comercial, en especial cuando las salmueras presentan bajas concentraciones de Li en las salmueras.
- ✓ Impacto ambiental: La evaporación agota los

acuíferos de salmuera, lo que puede causar hundimientos en los acuíferos de agua dulce suprayacentes y generar problemas de acceso al agua en regiones áridas (disminución de la humedad de suelos) provocando efectos irreversibles en los ecosistemas frágiles de la puna altiplánica.

- ✓ Dependencia del clima: Los proyectos dependen de condiciones áridas para evaporar eficientemente la salmuera y se debe evitar precipitaciones excesivas que puedan causar alteraciones en el proceso del sistema al aire libre (dilución de las salmueras ya concentradas en las respectivas piscinas de evaporación).
- ✓ Manejo de impurezas: El proceso concentra no solo litio sino también impurezas como magnesio, calcio y boro, lo que complica la producción y aumenta los costos.
- ✓ Cronogramas de desarrollo: los proyectos a menudo enfrentan problemas de permisos asociados con su gran huella hídrica.
- ✓ También tardan en ponerse en marcha, ya que los nuevos proyectos pueden necesitar hasta una década antes de lograr un producto precursor de grado de batería con la capacidad nominal. Por ejemplo, el proyecto Olaroz estuvo en desarrollo, construcción y puesta en marcha inicial durante 7 años, de 2008 a 2015, y luego tardó otros 9 años, de 2015 a 2023, en alcanzar su tasa de producción máxima actual de 16.700 tpa LCE, con solo el 39% previsto para su producción de carbonato de litio de calidad de grado de batería.
- ✓ Bajas recuperaciones: los proyectos normalmente recuperan solo entre el 40% y el 60% del litio presente en la salmuera.

Por otra parte, además de los aspectos tecnológicos de la extracción de litio, es importante tener en cuenta los gastos de capital (CAPEX) y los operativos (OPEX). La EDL y la evaporación solar tienen costos iniciales comparables. La EDL cuenta con CAPEX más elevados debido a sus requisitos de tecnología avanzada e infraestructura, que van de USD 45 000 a USD 80 000 por tonelada de carbonato de litio equivalente por año (tpa LCE), en comparación con USD 23 000 a USD 34 000 por tpa LCE para la evaporación solar (los CAPEX para la evaporación solar pueden ser un poco más elevados debido a la inflación en 2024 y otros factores). (H. Nicolaci, 2023)

Ambos métodos también tienen OPEX comparables, que van de USD 4500 a USD 7500 por tonelada de LCE para la EDL y de USD 4800 a USD 8000 por tonelada de LCE para la evaporación solar. En cambio, los OPEX de la minería en roca dura oscilan entre USD 6000 y USD 18 000 por tonelada de LCE. (Adams et al, 2023),

En el contexto arriba descrito, y en base al análisis comparativo desarrollado y presentado en la Figura 11, los procesos de adsorción, intercambio iónico y extracción por solventes se presentan como alternativas interesantes para producir sales precursoras de Litio a partir del Salar de Coipasa. La tabla siguiente, describe algunos aspectos importantes de estas tecnologías, incluyendo ventajas y desventajas (ILiA, 2024).

Aunque la extracción de solventes ha demostrado ser eficiente, todavía no está tan generalizada como para competir con otras técnicas de EDL a escala industrial. Sin embargo, tiene potencial para usarse como paso de postratamiento, para purificar el producto y alcanzar calidad de grado batería. A priori, se puede descartar la tecnología de extracción por solventes, toda vez que al pasar la salmuera por la etapa de extracción en la que el extractante catiónico disuelto en el diluyente orgánico reacciona químicamente con los iones litio presentes en la salmuera y forma un compuesto órgano metálico soluble en la fase orgánica, el efluente de descarga (salmuera residual), no puede ser directamente descargado al acuífero subterránea salino sin previo tratamiento exhaustivo y costoso, debido a la presencia de componentes orgánicos que pueden alterar el ecosistema salino subterráneo.

El Índice de Madurez Comercial (CRI) y el Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) son dos métricas que se usan para evaluar la madurez de las tecnologías, pero cada una se enfoca en distintos aspectos y tiene objetivos distintos. El TRL, creado por la NASA, mide la madurez técnica en una escala de 1 a 9 puntos. Este índice sigue el avance en la transformación de una tecnología de principios básicos a una operación en el mundo real, ante todo por medio de pruebas de laboratorio y en campo. El TRL se usa con frecuencia en I&D para evaluar el avance de una tecnología hacia su utilización. Como se muestra en la figura 16, los métodos de adsorción e intercambio iónico son los más avanzados; la adsorción alcanzó un TRL de 9, y cabe señalar que los sorbentes basados en aluminio ya se utilizan a escala completa. Sin embargo, otros sorbentes, como los basados en manganeso y titanio, aún se

encuentran en la etapa de prueba piloto 7-8[17]. Recientemente, Lake Resources anunció el Estudio de Factibilidad Definitiva (DFS) para su EDL

basada en intercambio iónico (usando tecnología de Lilac Solutions) en el proyecto de la salmuera de litio de Kachi en Argentina. (Lake Resources ,2023)

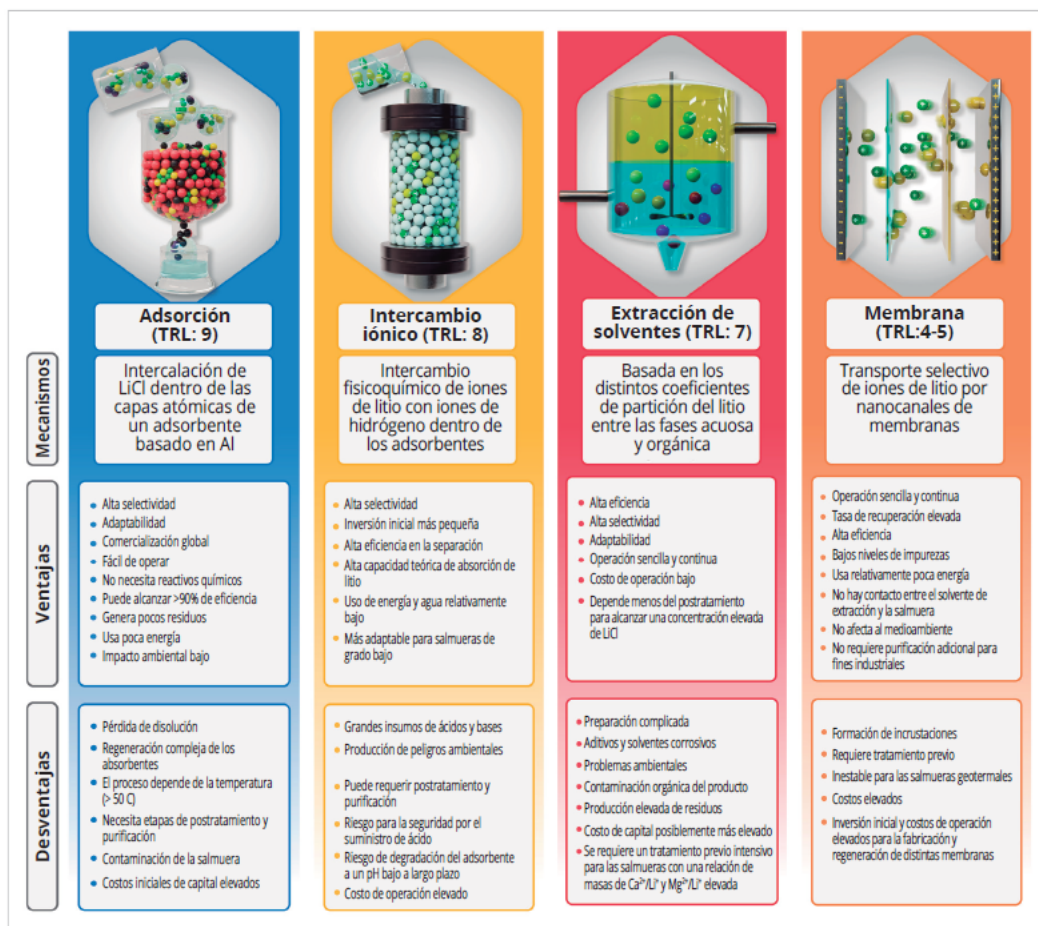


Figura 16.- Tabla comparativa de métodos de Extracción Directa de Litio (ILiA, 2024).

En el contexto arriba descrito, se considerarán los procesos tecnológicos de la adsorción y el intercambio iónico como las alternativas tecnológicas de extracción directa de litio de las salmueras del Salar de Coipasa más adecuadas.

a) Proceso tecnológico de la adsorción

Se basa en sorbentes sólidos (pueden ser hidróxidos, óxidos metálicos, sorbentes cerámicos, etc.) con alta afinidad por Li^{+} . El proceso típicamente se realiza por contacto de la salmuera con el sorbente en columna, donde el litio es capturado. Luego, mediante una solución de eluyente (ácido, pH ajustado, sales) se desorbe el Li^{+} para generar una solución concentrada (“eluato”).

Actualmente, sorbentes modernos pueden estar optimizados para alta selectividad y capacidad. Según recientes revisiones, se han desarrollado materiales con muy alta eficiencia incluso en salmueras diluidas y complejas. Huiqin Hu & etc (2024). La regeneración del sorbente puede requerir

químicos (ácidos, bases), y los ciclos de adsorción/desorción deben ser lo más largos posible para reducir costos operativos.

b) Proceso tecnológico de Intercambio Iónico

Utiliza resinas o esferas intercambiadoras (bases poliméricas) con sitios activos que intercambian iones. Por ejemplo, un catión Li^{+} en la salmuera puede intercambiarse con un H^{+} o Na^{+} en la resina. Después de la “captura”, la resina se regenera con un eluyente (generalmente ácido) para liberar Li^{+} en una solución concentrada. Estudios demostraron que se pueden obtener eluatos con alta densidad de Litio. (Jiavi Cen, 2024)

Las resinas deben ser altamente selectivas para Li^{+} frente a otros cationes (Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}), lo que requiere diseño molecular especializado. Uno de los retos es la estabilidad de la resina frente a ciclos repetidos, especialmente si se usan ácidos agresivos para regenerar. (Jiavi Cen, 2024)

Además, es importante considerar el uso de sustancias químicas para regeneración (transporte, consumo, impacto ambiental) y el coste asociado.

4.1. Estado del arte en su aplicación a escala piloto y/o industrial de procesos de adsorción e intercambio iónico como alternativas de extracción directa de litio de salmueras

a) Proceso de Adsorción

El Proyecto Fénix de Livent Corporation (Livent, 2022), es la primera operación que aplica el proceso de adsorción a salmueras de litio en el Salar del Hombre Muerto ubicado en el noroeste de Argentina, en la parte noreste de la provincia de Catamarca, en el límite con la provincia de Salta, para producir carbonato de litio a escala comercial. El proceso de Livent, para extraer litio del recurso de salmuera, consiste en bombear la salmuera que contiene litio desde los pozos de producción a la Planta de Adsorción Selectiva (SA), u

opcionalmente, a estanques de preconcentrado para concentración solar antes de ir a la Planta SA. La Planta SA utiliza agua dulce tratada y un proceso de adsorción patentado para eliminar selectivamente el litio de la salmuera. La corriente pulida sale de la Planta SA y se concentra aún más en estanques de evaporación solar llamados estanques de salmuera de salar terminado (FSB). La mezcla residual de salmuera estéril y agua dulce (generalmente denominada salmuera gastada) se envía a la laguna artificial donde se evapora o se infiltra nuevamente en el Salar. Parte de la salmuera terminada se envía a la Planta de Carbonato, donde reacciona con carbonato de sodio para producir carbonato de litio de grado técnico o para baterías. La salmuera terminada restante se envía a la Planta de Güemes, donde se utiliza para producir cloruro de litio de alta pureza. La figura siguiente muestra el flujograma del proceso señalado:

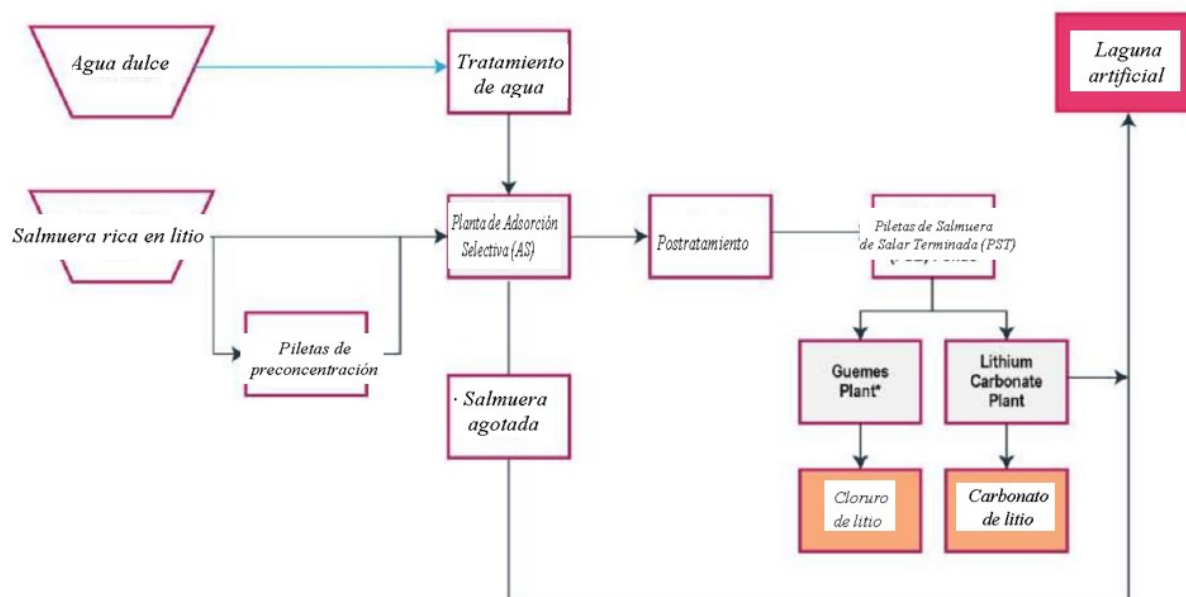


Figura 17.- Flujograma de tratamiento del proceso de adsorción para la extracción directa del litio de salmueras – Proyecto Fenix (Livent, 2023)

A nivel comercial, ha sido requerido la preconcentración de la salmuera antes de adsorción, típicamente con estanques de evaporación. Aun así, la recuperación general de litio reportada ha sido extremadamente pobre, con respecto a la deseada (calculado en un 42% según los datos publicados, teniendo en cuenta las pérdidas de litio en todo el sistema).

Durante los últimos 25 años, se han realizado numerosos esfuerzos para adaptar la tecnología de adsorción a salmueras con menores concentraciones de litio y mayores niveles de impurezas. Algunos proyectos en China han logrado la producción mediante el uso de adsorción para procesar flujos de

subproductos enriquecidos con litio de la producción de potasa. (Forward Water Technologies Corp., 2024)

Sin embargo, estos proyectos generalmente tienen volúmenes de producción modestos debido a limitaciones de ubicación cerca de instalaciones de potasa y parece que todavía dependen de la preconcentración de la salmuera.

En última instancia, la tecnología de la adsorción existente en operación comercial hoy en día se ha enfrentado a desafíos principales que le han impedido desempeñar un papel importante en el crecimiento del suministro de litio durante la última década (Alkem, 2023):

- ✓ Consumo de agua dulce: Se necesita una cantidad significativa de agua dulce para eliminar el cloruro de litio del material adsorbente cargado, incluso después de considerar el reciclaje del agua. En regiones con escasez de agua, como los desiertos altos de América del Sur, donde la conservación del agua es fundamental para las comunidades locales, puede limitar su aplicación para tasas de producción altas (60 - 100 m³/t LiCO₃ producido).
- ✓ Evaporación requerida: Los proyectos de adsorción a gran escala que están en funcionamiento hoy en día generalmente dependen de estanques de evaporación para preconcentrar la salmuera hasta alcanzar valores iniciales por encima de 650 mg/L de Li. En la mayoría de los recursos de litio a nivel mundial, utilizar la evaporación no es factible debido a las regulaciones ambientales y el costo.
- ✓ Mala recuperación de litio: Si bien algunos proveedores de la tecnología de adsorción afirman una alta recuperación de DLE, a menudo no logran alcanzar las mismas; en especial, para salmueras con bajas concentraciones en Litio en la salmuera.
- ✓ Relativa selectividad de adsorción de iones Litio de la salmuera: Las especies iónicas como Ca⁺² y Mg⁺² son también adsorbidas en el sorbente, además, aunque en menor proporción, las de Na⁺¹; por lo que, se requieren etapas de eliminación de dichas impurezas con la técnica de membranas, antes la precipitación del carbonato de litio.
- ✓ Precalentamiento de salmuera: Los procesos de adsorción necesitan que la salmuera se caliente entre 40 y 95 °C para funcionar de manera óptima, aumentando el consumo de energía y las emisiones de GEI. A medida que las leyes del litio disminuyen con el tiempo con la dilución, los caudales de salmuera y los costos de calefacción correspondientes, pueden aumentar dramáticamente.
- ✓ Precalentamiento y calidad del agua en la etapa de desorción: El agua para la desorción debe ser de alta calidad, por lo que el agua de la Ósmosis Inversa (permeado) se apropia para este fin. La cinética de la desorción está directamente vinculada con la temperatura; por lo que, a mayor

temperatura de esta, mejor la velocidad de desorción de las especies de ion litio adsorbidas.

- ✓ Tolerancia a las impurezas: Los procesos de adsorción son intolerantes al arsénico, el plomo y otras impurezas. Esto conduce a una menor capacidad de adsorción de Litio y a una degradación acelerada de los materiales. Otras especies aniónicas como carbonato y sulfato también interfieren con la operación de adsorción.
- ✓ Mala tolerancia a la dilución: La reinyección de salmuera gastada puede provocar una disminución de las leyes del litio durante la vida útil de un proyecto debido a la dilución. Esto plantea un riesgo importante para la tecnología de adsorción debido a sus dificultades para lograr recuperaciones elevadas sostenidas en salmueras de baja ley.

Hoy en día, la mayoría de las empresas que comercializan nuevas tecnologías DLE basados en sistemas de adsorción, afirman haber mejorado el rendimiento de dicha tecnología que se encuentra actualmente en operación comercial.

Las reservas de Litio en el proyecto Fenix son de aproximadamente 2220 kM t (1328 medido e indicado y 892 inferido). Entre los datos financieros clave están: VAN de 7,168 Millones de dólares, CAPEX de 1372 Millones de dólares, una vida útil de 40 años y una Tasa interna después de impuestos de 836%, con un precio de mercado del carbonato de litio de 20000 dólares la tonelada. (Livent, 2022)

b) Intercambio Iónico

A lo largo del tiempo, varios intentos han surgido de la aplicación del Intercambio Iónico para la extracción de Litio de salmueras. La firma Lilac, es la que mayor evolución ha reportado a través de cuatro generaciones distintas enfocadas en la optimización del proceso en términos de rendimiento, escalabilidad y costos. (Lilac, 2024)

Cada generación se ha basado en avances anteriores, lo que ha dado como resultado mejoras acumulativas en el rendimiento y la confiabilidad de la tecnología. Este proceso iterativo ha culminado en una innovadora combinación de recuperación de litio, rechazo de impurezas, durabilidad de las resinas y altos caudales de tratamiento en sistemas modulares. Uno de los temas más dificultosos de abordar, ha sido la resistencia de la resina utilizada a los ciclos de cargado y descarga. El propósito es alcanzar el mayor número de ciclos, con rendimientos óptimos y sin desgaste físico-químico de la resina. (Weng et al, 2020; Hossain et al 2022)

La tecnología Gen 4 de Lilac ha reportado un aumento de la vida útil esperada a aproximadamente 4000 ciclos y al mismo tiempo mejoró la confiabilidad y la operatividad según la experiencia con módulos piloto.

Las tasas de recuperación de litio se mantuvieron altas durante el ciclado de por encima de 90 % para la mayoría de las salmueras y el costo de capital del sistema de intercambio iónico para un proyecto se redujo en casi un 50 % gracias al mayor rendimiento del módulo, lo que llevó a un menor recuento de módulos IX. Por último, Gen 4 redujo el consumo de ácido y base en un 10%, lo que redujo aún más los costos operativos de los proyectos.

La firma Lilac reporta que ha desarrollado experiencias para trabajar eficazmente con salmueras complejas de baja calidad y al utilizar un uso mínimo de superficie en sus instalaciones y los menores consumos de agua dulce en su proceso. Los beneficios en sus experiencias reportan (Lilac, 2024):

- ✓ Eficacia de extracción de litio de en salmueras difíciles: El proceso de intercambio iónico de Lilac extrae litio a altas tasas de recuperación sostenidas, desde salmueras de grado ultra bajo de 50 mg/L hasta salmueras de alto grado de 2000 mg/L, en una amplia variedad de características químicas de salmuera complejas. Lo consigue sin estanques de evaporación ni ninguna otra forma de preconcentración, reduciendo el uso del suelo hasta 30 veces.
- ✓ Bajo uso de agua dulce: A diferencia del proceso de adsorción, la firma Lilac no utiliza agua como agente de desorción. Esto da como resultado un consumo de agua dulce hasta 10 veces menor.
- ✓ Diagrama de flujo optimizado: Se señala que Lilac tiene una alta tolerancia a las impurezas, lo que significa que no es necesaria la nanofiltración ni la eliminación de carbonatos, produciendo un eluato de litio altamente concentrado (2640 mg/L frente a 300-1200 mg/L para adsorción) con niveles de impureza muy bajos, lo que simplifica los pasos de procesamiento posteriores.
- ✓ Sin precalentamiento de salmuera: A diferencia de la adsorción, el proceso de intercambio iónico de Lilac, es muy eficaz a temperatura ambiente, eliminando la necesidad de un costoso e intensivo calentamiento de salmuera.
- ✓ Cinética de extracción rápida: El proceso de intercambio iónico de Lilac puede recuperar el 90% del litio de una salmuera cruda de 70 mg/L con una proporción de 200:1 Mg:Li. relación en

tan sólo un minuto. Esta velocidad se traduce en módulos compactos con alto rendimiento, bajo gasto de capital e inventario del proceso reducido.

- ✓ Tolerante a la dilución: Debido a que el proceso de Intercambio Iónico de Lilac es eficaz para extraer litio de salmueras con bajos contenidos de Litio, incluso bajo condiciones de reinyección de salmuera gastada en el depósito que podría generar dilución de la concentración de Litio.
- ✓ Flexibilidad del diagrama de flujo: Lilac IX produce un concentrado de cloruro o sulfato de litio, lo que permite la compatibilidad con diagramas de flujo convencionales de carbonato o hidróxido de litio.

Datos técnicos de la tecnología de Intercambio Iónico de Lilac estiman un OPEX total que oscila entre 4.000 y 7.000 \$/t LCE, que incluye el bombeo de salmuera hasta la producción de litio apto para baterías.

En la Tabla 2 se presenta una comparación entre ambos procesos de extracción directa de litio.

La comparación entre los procesos de absorción e intercambio iónico en el contexto del Salar de Coipasa revela una serie de trade-offs:

1. Selectividad vs robustez

- Las resinas de intercambio iónico pueden ofrecer muy alta selectividad, pero su estabilidad frente a regeneraciones químicas agresivas puede ser un desafío.
- Los sorbentes (adsorbentes) pueden ser más robustos mecánicamente y químicamente, especialmente si están hechos de materiales inorgánicos, pero podrían tener menor selectividad.

2. Concentraciones iniciales y finales de litio

- Mediante intercambio iónico, se pueden tratar salmueras con menores concentraciones de Litio en la salmuera, sin requerir etapas de preconcentración por evaporación solar. Además, las salmueras finales son más enriquecidas.
- Por adsorción, se requiere salmueras de mayor concentración inicial para tener mayores extracciones. Además, las salmueras finales son menos concentradas.

Parámetro	Lilac Intercambio Iónico	Adsorbentes de alúmina
Recuperación de Litio (en tiempos de residencia económicamente relevantes)	80–98%	30–95%
Concentración de litio en refinado (litio perdido en salmuera gastada, mg/L)	10–30	100–200
Grado mínimo económico de litio (mg/L)	50	300
Precalentamiento de salmuera	No	Sí (45–90°C)
Consumo de agua dulce (m³/t LCE)	2–20	100–120
Eluato de cloruro de litio	Sí	Sí
Eluato de sulfato de litio	Sí	No
Tolera Fe, Mn	No	No
Tolera As, Pb, CO₃, SO₄	Sí	No
Requisitos de ácido en proceso (Hoja de flujo típico de salmuera a Li ₂ CO ₃)	Si	No

Tabla 2.- Comparación de datos técnicos entre los procesos tecnológicos de adsorción e intercambio iónico para la extracción directa de litio de salmueras (Lilac, 2024)

3. Costos operativos y regeneración

- La regeneración con ácido para resinas puede implicar costos en transporte, manejo, neutralización y tratamiento de eluatos.
- La absorción puede requerir menos química si los sorbentes están diseñados para desorber en condiciones suaves, lo que puede reducir costos y riesgos. Aunque, se requiere el calentamiento de las soluciones de desorción.

4. Impacto ambiental

- Las DLE aplicadas correctamente pueden reducir la huella hídrica (evitan grandes piscinas) y acelerar la producción (horas/días vs meses o años).
- El proceso del intercambio iónico puede requerir menor cantidad de agua dulce, energía y generar menores emisiones de gases efecto invernadero que el proceso de adsorción. Un análisis del ciclo de vida comparativo,

permitiría generar mayor información comparativa.

- En un salar frágil como Coipasa, la minimización del uso de químicos y la reinyección de salmuera empobrecida pueden ser condiciones clave para la sostenibilidad social y ecológica.

5. Implementación piloto y riesgo tecnológico

- La planta piloto modular de YLB en Coipasa ya en operación brinda una oportunidad valiosa para validar tecnologías DLE bajo condiciones reales.
- Se deben gestionar riesgos como la degradación de materiales, fouling, pérdidas de capacidad, y asegurar ciclos de regeneración viables para un proyecto a escala industrial.
- La adsorción tiene como principal fortaleza su aplicación ya industrial.
- El intercambio iónico, presenta como fortaleza su flexibilidad modular, lo que permitiría a nivel

industrial, incrementar la capacidad de producción con más rapidez.

4.3 Propuestas alternativas de aplicación de extracción directa de litio del Salar de Coipasa

a) Proceso de adsorción

El flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa por adsorción contemplaría las etapas siguientes:

- Enriquecimiento de Li por piscina de evaporación hasta alcanzar concentraciones de lito por encima de 700 ppm.
- Enriquecimiento por adsorción y desorción. Para la desorción se requiere agua pura procedente de la ósmosis inversa, la que debe ser calentada por energía solar.
- Eliminación de Mg, Ca y Sulfato por nano filtración por membranas.

- Enriquecimiento de la salmuera residual por ósmosis inversa que permite la precipitación del NaCl por enriquecimiento de la misma, dejando por una parte una salmuera residual concentrada en LiCl y por otra, agua pura requerida en el proceso de desorción e incluso para su uso por los pobladores.
- Calentamiento de la salmuera residual para precipitar el Mg, Ca y B remanentes por filtración.
- Recuperación del LiCO_3 por precipitación de la salmuera residual a 75 °C.

El flujograma propuesto se presenta en la figura siguiente:

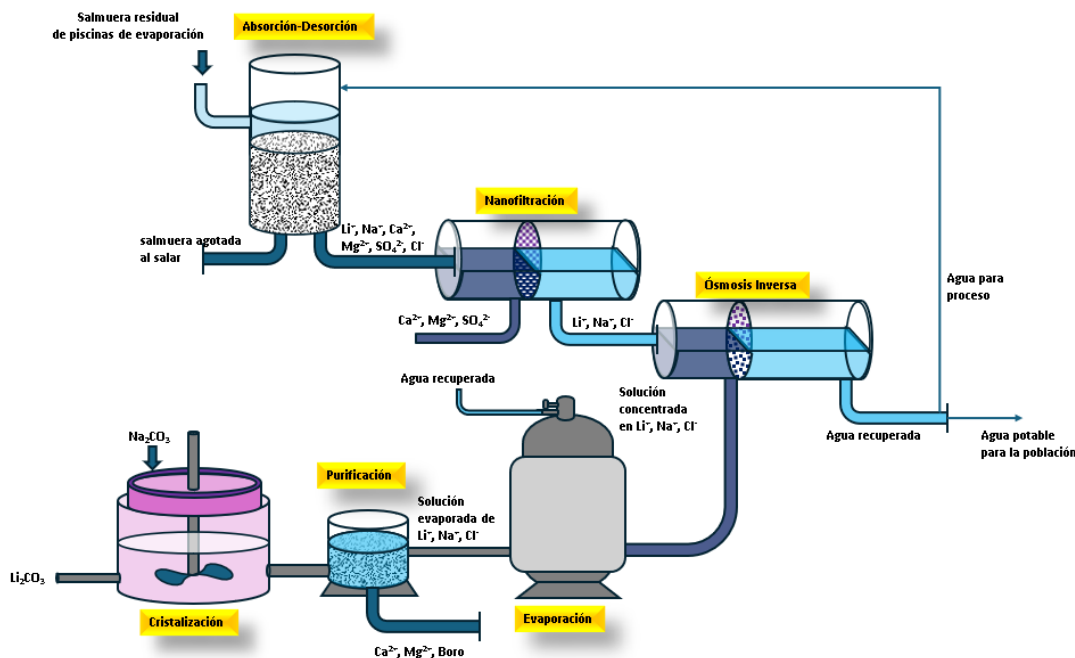


Figura 18.- Propuesta de flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa por el proceso tecnológico de adsorción.

b) Proceso de Intercambio Iónico

El flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa por intercambio iónico contemplaría las etapas siguientes:

- Enriquecimiento de Li por intercambio iónico. Para la etapa de descargado, previa etapa de lavado de las columnas de cargadas, se requiere soluciones de ácido clorhídrico.
- Eliminación de Mg, Ca y Sulfato por nano filtración por membranas o intercambio ad-hoc o procesos químicos.

- Calentamiento de la salmuera residual para precipitar el Mg, Ca y B remanentes por filtración.
- Recuperación del $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ o LiCO_3 (dependiendo del mercado final) mediante procesos de electrólisis, metatésis o químicos por precipitación de la salmuera residual a 75 °C, respectivamente.

El flujograma propuesto se presenta en la figura 19.

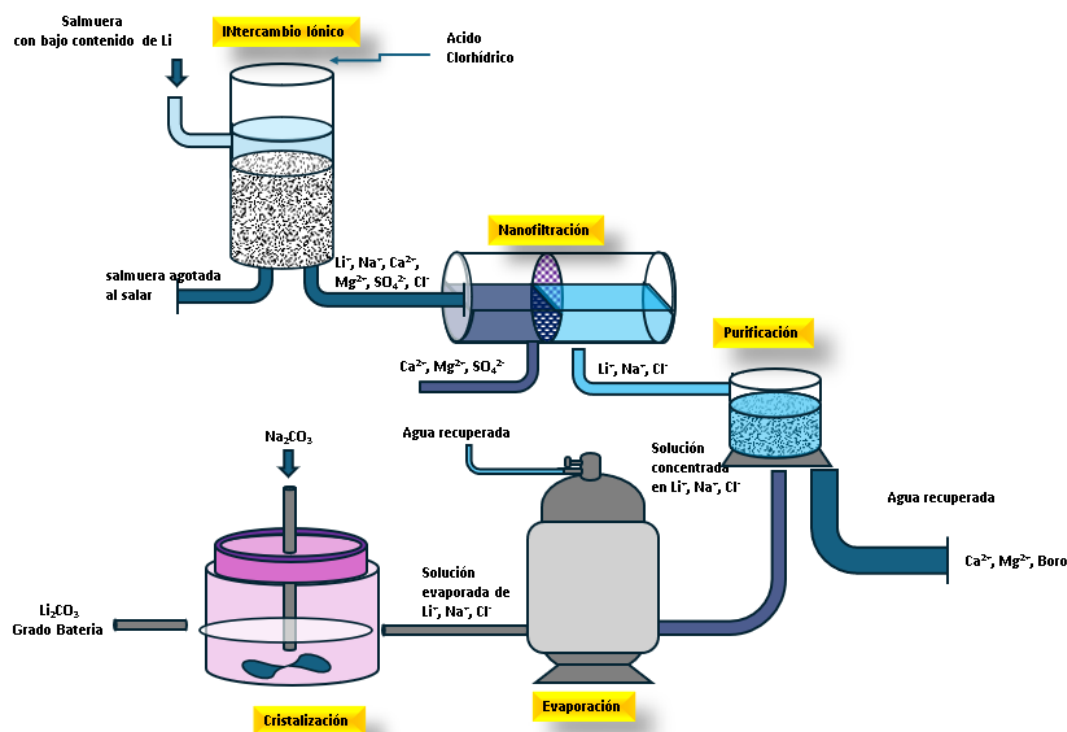


Figura 19.- Propuesta de flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa por el proceso tecnológico de Intercambio Iónico.

6.-

Conclusiones

- Las relaciones de Mg/Li y de SO₄/Li de las salmueras de Coipasa son de 42.74 y 83.14; valores demasiados altos para esperar altas extracciones por el proceso convencionales de extracción del Litio; considerando además una baja concentración de Litio de 339.1 mg/L en la salmuera.
- La evaporación en la zona del Salar de Coipas es menor a 1500 mm y las precipitaciones fluviales oscilan entre 100 y 200 mm; equivale a decir que, se tiene en promedio 29 días de lluvia.
- Las tasas de extracción de salmueras serían por encima de 140 m³/s y las extracciones por el proceso convencional estarían por debajo del 20 % por el arrastre del Li por los fenómenos de coprecipitación, adsorción y oclusión.
- La extracción directa (DLE) es una ruta prometedora para el Salar de Coipasa, dada la baja concentración de litio y la presencia de competidores iónicos que dificultan los métodos convencionales de evaporación.

- Tanto la absorción con sorbentes como el intercambio iónico ofrecen ventajas técnicas, pero la elección óptima depende de un balance entre selectividad, estabilidad del material, costos operativos y consideraciones ambientales.
- El proceso de adsorción – desorción, membranas y ósmosis inversa, se constituiría en una alternativa tecnológica para la obtención de LiCO₃ de las salmueras del salar de Coipasa, zona de alta escases hídrica.
- El proceso de intercambio iónico y membranas, permitiría la obtención de LiCl, LiOH·H₂O o LiCO₃ LiOH·H₂O o LiCO₃ de acuerdo a la demanda.
- Se recomienda realizar ensayos piloto con ambos enfoques, con un enfoque riguroso en la caracterización de la salmuera, pruebas de ciclos, regeneración y análisis de ciclo de vida.
- Un análisis TEA (análisis technoeconómico) y LCA (ciclo de vida) integrado es esencial para determinar la sostenibilidad

y viabilidad comercial de la tecnología seleccionada para Coipasa.

- A largo plazo, la adopción de DLE podría reducir significativamente los tiempos de producción, minimizar impactos

ambientales y posicionar a Bolivia como líder en extracción moderna de litio en salares, si se demuestra que las tecnologías funcionan de forma sostenible y rentable.

BIBLIOGRAFÍA

V. Lebrun, P. Pacosillo, J. Gutierrez, F. Caceres, E. Pool & E. Pirard. (2002). "Geochemistry of bitter brines in the Salar de Coipasa - Bolivia." J. Andrew Nunnerya, Sherilyn C. Fritz, Paul A. Bakera, (2018). Wout Salenbiena Lake-level variability in Salar de Coipasa, Bolivia during the past ~40,000 yr. Quaternary Research. ERICKSEN, G.E., VINE, J.D. & BALLON; R. (1978). Chemical composition and distribution of lithium-rich brines in salar de Uyuni and nearby salars in Southwestern Bolivia. Energy 3, 355-363. Rettig, S.L., Davis, J.R., Smith, R.L., Smith, K.A. & Erickson, G.E. (1979). Bolivia. U.S. Geological Survey Professional Paper. p. 321. RISACHER, F. (1992). Géochimie des lacs salés et croûtes de sel de l'Altiplano bolivien. Sci. Géol. Bull. 45, 3-4, 219pp. Risacher, F. & Fritz, B. (1991). Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. Chemical Geology 90, 211-231. Shuler, M., Blanc-Valleron, M.M. & Risacher, F. (1995). La matière organique des alternances sel-marne du salar d'Uyuni (Altiplano, Bolivie): études géochimiques et palynologiques. Sci. Géol. Bull. 48, 4, 211-247. Pirard, Eric (2011). "Les ressources du sous-sol bolivien: mirage ou véritable "El Dorado". Université de Liège. Banks, D., Markland, H., Smith, P.V., Mendez, C., Rodriguez, J., Huerta, A., Sæther, O.M., 2004. Distribution, salinity and pH dependence of elements in surface waters of the catchment areas of the Salars of Coipasa and Uyuni, Bolivian Altiplano. Journal of Geochemical Exploration 84, 141-166. Sanjinez Zeballos, Rosendo (2022). "El oro blanco de los Andes, Paradigmas de la minería e industrialización del Litio en Bolivia" Risacher F., Fritz B. (1991), Quaternary geochemical evolution of the salars de Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia, Chemical Geology, 90, 211-231 D. Jiménez (2022). Agregación de valor en la producción de compuestos de litio en la región del

triángulo del litio. Publicación de las Naciones Unidas.

Ambermale Corporation, Informe Técnico. 2020 Farjana, S. H., Huda, N., & Mahmud, M. P. (2019). Life cycle assessment of metals: A comparative study of copper, nickel, and cobalt production. Journal of Cleaner Production, 231, 1035-1045. División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). Extracción e industrialización del litio - Oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe. M. Lee Yin. (2022). Tecnologías de concentración de litio alternativas a las pozas de evaporación (2020). Tesis de grado de magister. Pontificia Universidad Santiago de Chile. Neo Lithium Corp. (2018). Tres Quebradas (3Q) Lithium Project: Corporate Presentation. Halkes, R. T., Hughes, A., Wall, F., Lindsay, J., & otros. (2024). Life cycle assessment and water use impacts of lithium production from salar deposits: Challenges and opportunities. Resources, Conservation & Recycling, 207, 107554. Adams, Reuben (2023), "Ride the cycles: where does your favourite ASX lithium project sit on the cost curve?", enero de 2024. Desbloqueo de salmuera de litio - Producción con intercambio iónico (Junio de 2024, Lilac Solutions, Inc.) Lake Resources (2023), "Lake Resources and Lilac Solutions Announce Achievement of Major Milestone for Project Kachi", abril de 2023. Lake Resources (2023), "ASX Announcement, Lake resources kachi project phase one definitive feasibility study", diciembre de 2023. Huiqin Hu, Xunsheng Guo, Liming Yang, Yubo Wu, Guang Yang, Xubiao Luo. Adsorption Materials toward Highly-Efficient Lithium Extraction from Non-Conventional Lithium Sources. First published: 14 July 2025 Dr Jiayi Cen Direct Lithium Extraction: Reshaping Brine Mining Possibilities. Aoû 21, 2024. Informe de Sostenibilidad 2022 (Livent, 2022) Informe de Recursos y Reservas - Estudio de Prefactibilidad - Salar del Hombre Muerto (Livent, noviembre de 2023) Informe Anual 2023 (Allkem, 2023)

Proyecto Olaroz (Allkem, 2023)
Informe de recursos y reservas. Estudio de prefactibilidad Salar del Hombre Muerto. Livent (2022)
Hossain, SM, Ibrahim, I., Choo, Y., Razmjou, A., Naidu, G., Tijing, L, Shon, HK (2022). Preparación de un tamiz de iones de litio eficaz a partir de TiO₂ generado por lodos. *Desalación*, 525, 115491.
Weng, D., Duan, H., Hou, Y., Huo, J., Chen, L., Zhang, F. y Wang, J. (2020). Introducción de la revisión Sieve-A de iones de litio a base de manganeso. *Progreso en ciencias naturales: Materials International*, 30(2), 139-152.
Investor Update (Lake Resources, junio de 2023)
H. Nicolaci, Young, P., Snowdon, N., Rai, A., Chen, T., Zhang, J., Lin, Y., Bailey, E., Shi, R. y Zheng, N. (2023), Direct Lithium Extraction: A potential game changing technology, Goldman Sachs.
Direct Lithium Extraction (DLE): An Introduction (v.1). ILiA.. International Lithium Association (ILiA). (2024).

Seminario web: Escalando con aluminato: optimización del rendimiento de LADH (Forward Water Technologies Corp., marzo de 2024)
Vera, ML, Torres WR, Galli CI, Chagnes A., Flexer V. Impacto ambiental de la extracción directa de litio de salmueras. *Nature Reviews Earth and Environment*, 4, 2023
María L. Vera, Walter R. Torres, Claudia I. Galli, Alexandre Chagnes & Victoria Flexer. *Nature Reviews Earth & Environment* volume 4, pages149–165 (2023)
Saleem, Andre Wilhelms, Jonas Sottmann, Hanna & K. Knuutila. Direct lithium extraction (DLE) methods and their potential in Li-ion battery recycling. *Separation and Purification Technology*. Volume 361, Part 2, 19 July 2025, 131315

Artículo recibido en: 18.10.2025

Artículo aceptado: 04.11.2025

Artículo manejado por Elvys Trujillo L.