

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, Antônio José Rodrigues do. & LIMA FILHO, Clóvis Ático. Mineração. In: Geologia e Mineração. Recife: 4º Distrito do DNPM-Pernambuco. Disponível em: <<http://dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineração.php>> Acesso em: 29 de Agosto de 2014.
- CARLOS, J. G., NEYMAYER, P. L., NILTON, T., SELMIR, S., JOSEMAR, C. (2013). ROTA DE PROCESSO OTIMIZADA PARA CONCENTRAÇÃO DE ITABIRITOS POBRES DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINÉRIOS & MINERALES.
- CHEMALE, F. e ROSIÉRE, C.A. (2008). ITABIRITOS E MINÉRIOS DE FERRO DE ALTO TEOR DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – UMA VISÃO GERAL E DISCUSSÃO.
- SOUZA, N. (2010). ANÁLISE CRÍTICA DE ROTAS DE PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICOS. Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Metalúrgica, Rio de Janeiro.

Artículo recibido en: 15.05.2024

Artículo aceptado: 04.06.2024

## BASES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL SUSTENTABLE PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBONATO DE LITIO DE LAS SALMUERAS DEL SALAR DE COIPASA

<sup>1</sup> Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.

<sup>2</sup> M. Sc. Ing. Jorge Gutierrez

<sup>3</sup> Ing. Omar Conde

<sup>1</sup> Docente - Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro

<sup>2</sup> Docente – Carrera de Geología - Universidad Técnica de Oruro

<sup>3</sup> Gerente – Laboratorios de Análisis Químicos Conde Morales

[gerardozamorachenique@yahoo.es](mailto:gerardozamorachenique@yahoo.es)

[omarconde@hotmail.com](mailto:omarconde@hotmail.com)

[fni.jorge@gmail.com](mailto:fni.jorge@gmail.com)

## RESUMEN

En Bolivia, el altiplano es una cuenca endorreica de  $\pm 200000 \text{ km}^2$  ubicada a 4000 msnm que se encuentra entre la Cordillera Occidental y Oriental, y que por sus características meteorológicas que presenta dicha cuenca, tiene las condiciones ideales para la formación de ambientes evaporíticos. Dos amplias costras de sal llenan el centro Altiplano: se les conoce como Salar de Uyuni ( $10000 \text{ km}^2$ , 3653 m) y Salar de Coipasa ( $2500 \text{ km}^2$ , 3656 m). El Salar de Coipasa ( $68^\circ 8' \text{W}$ ,  $19^\circ 23' \text{S}$ ), es el segundo salar más grande del Altiplano boliviano, y se encuentra al noroeste del Salar de Uyuni. El salar de Coipasa tiene mayor significancia como recurso estratégico de litio para el departamento de Oruro en Bolivia. En el marco de la Federal Direction for International Cooperation (DGCI) (1996-2000), la Universidad belga 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 y extraído muestras de salmueras cuyos resultados de análisis químicos arrojaron una concentración media de litio de 339.1 mg/L y relaciones de Mg/Li y  $\text{SO}_4/\text{Li}$  de 42.74 y 83.14, respectivamente, previéndose extracciones de litio por el proceso convencional por piscinas de evaporación y posteriores etapas de eliminación de impurezas hasta la obtención de  $\text{LiCO}_3$  por debajo del 20 % por el arrastre del litio en los productos de la etapa de enriquecimiento por cristalización y en la eliminación de impurezas de precipitación. Por otra parte, la evaporación en la zona del Salar de Coipasa es menor a 1500 mm y las precipitaciones fluviales oscilan entre 100 y 200 mm; por lo que para alcanzar una producción mayor a 15000 t de  $\text{LiCO}_3$  se requerirían más de 3000 Has en piscinas de evaporación, con tiempos de tratamiento más largos que 18 meses de operación. Por tanto, se califica de “técnicamente 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 sus ventajas competitivas de mayor eficiencia, tiempos cortos de extracción, costos competitivos y significativamente una menor huella hídrica. El proceso propuesto involucra el proceso de adsorción – desorción, membranas y ósmosis inversa, se constituiría en el proceso más adecuado para la obtención de  $\text{LiCO}_3$  de las salmueras del salar de Coipasa, zona de alta escases hídrica.

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

## ABSTRACT

In Bolivia, the altiplano is an endorheic basin of  $\pm 200,000$  km<sup>2</sup> located at 4000 meters above sea level that is located between the Western and Eastern Cordillera, and due to its meteorological characteristics that said basin presents, it has ideal conditions for the formation of evaporitic environments. Two broad salt coasts fill the central Altiplano: they are known as Salar de Uyuni (10,000 km<sup>2</sup>, 3,653 m) and Salar de Coipasa (2,500 km<sup>2</sup>, 3,656 m). The Salar de Coipasa (68°8'W, 19°23'S), is the second largest salt flat in the Bolivian Altiplano, and is located northwest of the Salar de Uyuni. The Coipasa salt flat is of greater importance as a strategic lithium resource for the department of Oruro in Bolivia.

Within the framework of the Federal Directorate of International Cooperation (DGCI) (1996-2000), the Belgian University of Liege and the Technical University of Oruro, have carried out a systematic survey of the Salar de Coipasa with a 2 by 2 km mesh and extracted brine samples whose chemical analysis results showed an average lithium concentration of 339.1 mg/L and Mg/Li and SO<sub>4</sub>/Li ratios of 42.74 and 83.14, respectively, foreseeing lithium extraction by the conventional process through evaporation pools and subsequent impurity elimination stages until obtaining LiCO<sub>3</sub> below 20% by removing lithium in the products of the enrichment stage by crystallization and in the elimination of precipitation impurities. On the other hand, evaporation in the Salar de Coipasa area is less than 1500 mm and river rainfall ranges between 100 and 200 mm; Therefore, to achieve a production greater than 15,000 t of LiCO<sub>3</sub>, more than 3,000 hectares of evaporation pools would be required, with treatment times longer than 18 months of operation. Therefore, the possibility of extracting lithium from Coipasa brines through conventional processes is described as "technically difficult." That is, the extraction of lithium from the Coipasa salt flat should be carried out by the direct extraction method, considering its competitive advantages of greater efficiency, short extraction times, competitive costs and significantly a smaller water footprint. The proposed process involves the adsorption-desorption process, membranes and reverse osmosis, it would constitute the most appropriate process for obtaining LiCO<sub>3</sub> from the brines of the Coipasa salt flat, an area of high water scarcity.

**Key words:** Salar de Coipasa - Lithium extraction from brines – EDL of Coipasa brines

### 1. Introducción

Desde el punto de vista geológico, el Altiplano Boliviano es una gran cuenca cerrada de 200,000 km<sup>2</sup> situada a 4,000 metros de altitud en los Andes bolivianos. Está limitado al este por la Cordillera Real y al oeste por la Cordillera Occidental. Sedimentos paleozoicos (pizarras, areniscas, cuarcitas) predominan en la Cordillera Real. También constituyen el basamento del Altiplano, donde se superponen a gruesas series vulcano sedimentarias del Cretácico, Terciario y Cuaternario (areniscas, arcillas, fangolitas, pizarras y evaporitas). La secuencia sedimentaria continental alcanza un espesor total de unos 15,000 metros. Los diapiros de yeso de edad terciaria abarcan en el norte y centro-este de la cuenca. La Cordillera Occidental es de origen volcánico. Los estratovolcanes, las coladas de lava y las ignimbritas que se superponen a las formaciones terciarias representan las principales formaciones volcánicas se encuentran en la mayor parte de esta cordillera. (V. Lebrun et al., 1997).

Dos amplias costras de sal rellenan el Altiplano central: el Salar de Uyuni (10,000 km<sup>2</sup>, 3,653 m) y Salar de Coipasa (2,500 km<sup>2</sup>, 3,656 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 km<sup>2</sup>) 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.).

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 2.5m cerca de su centro y se estrecha a <0.5m en el margen del salar (Risacher y Fritz, 1991). Además, es el único de su tipo que posee un lago interior. Los principales tributarios del salar de Coipasa, aparte del Río Lauca, son el Río Sabaya al Norte, el Río Laca Jahuirá 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 2,5m y está hecho de halita porosa que pasa hacia cada vez más mirabilia más abundante (Na<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> .10H<sub>2</sub>O) en la base. El perfil de la costra salina del salar de Coipasa puede ser representada como se muestra en la figura 2.

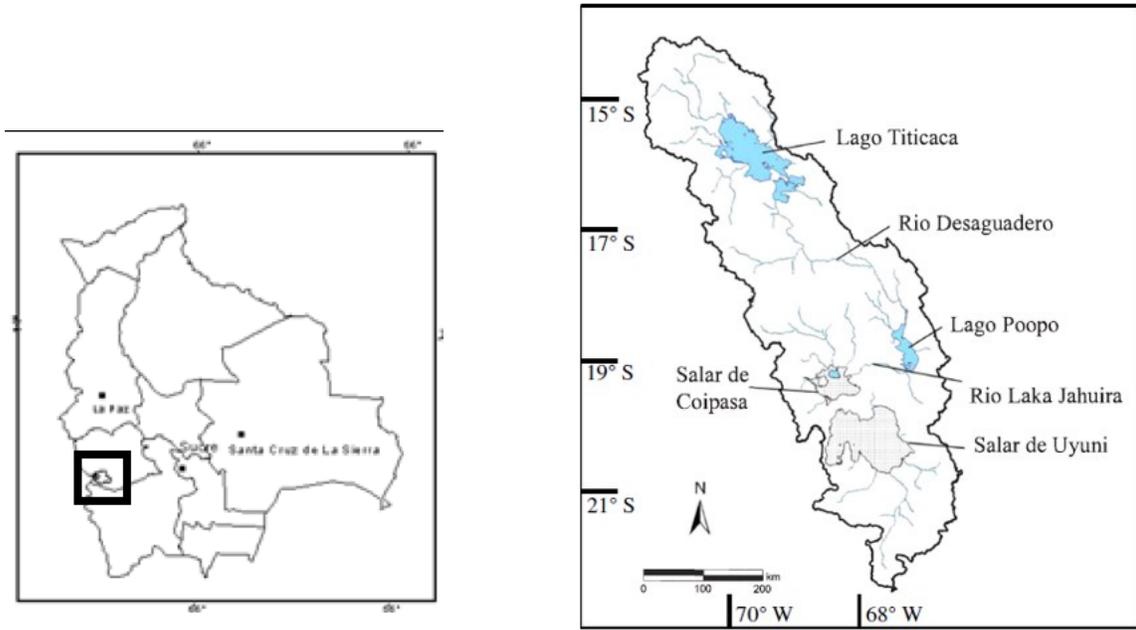


Figura 1.- Localización del salar de Coipasa

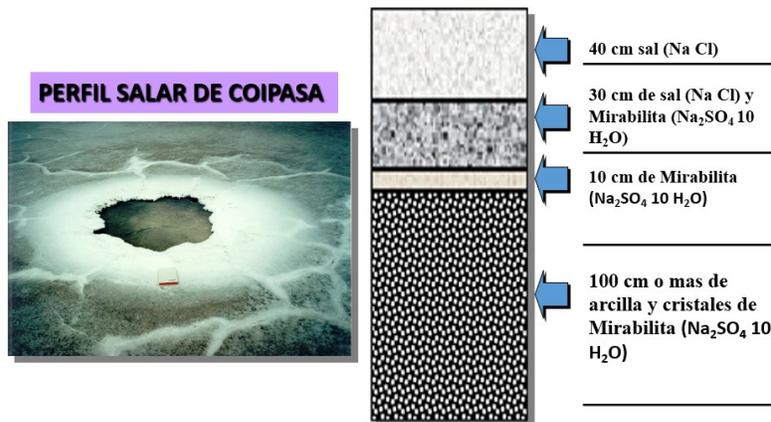


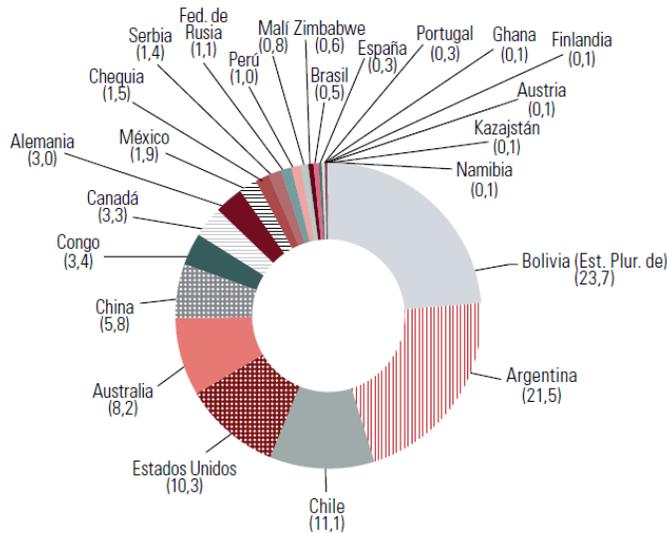
Figura 2.- Perfil de la costra salina del salar de Coipasa

## 2.- Cadena de valor del Litio a nivel global

El litio, insustituible para la producción de las baterías de iones de litio, es uno de los elementos fundamentales para la transición energética, tecnología clave para la descarbonización del transporte y el almacenamiento de energía generada a partir de fuentes renovables. Además, considerado como un recurso estratégico por los países que cuentan con yacimientos abundantes.

Argentina, Bolivia y Chile, en América Latina, destacan en el denominado “triángulo del litio”, al

tiempo que el Brasil, México y el Perú, con depósitos menos extensos, tienen posibilidades de desarrollar una importante producción para contribuir al desarrollo económico de dichos países a través de la cadena de valor asociada a la producción y a las exportaciones, el empleo y a la recaudación fiscal. En materia de recursos identificados, los países del triángulo del litio cuentan con el 56% del total mundial, tal como se muestra en la figura siguiente:

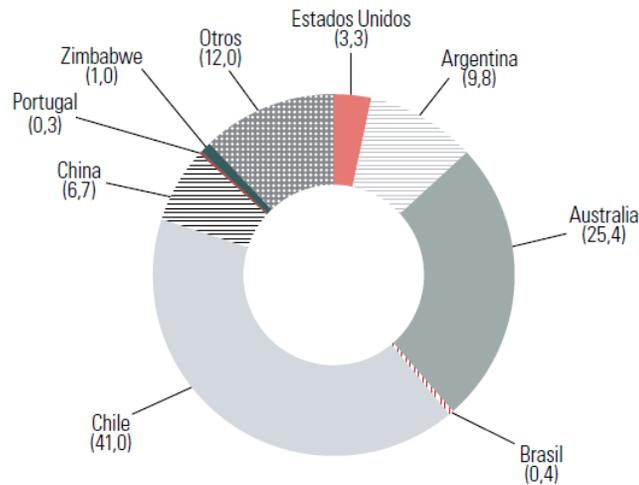


**Figura 3.- Participación mundial en recursos de litio, por país, 2021 (En porcentajes)**

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)

A la hora de considerar las reservas minerales, es decir, la porción de los recursos identificados que puede extraerse de manera económica con la tecnología disponible, el panorama cambia

considerablemente para algunos países de la región, como puede apreciarse en la figura siguiente:

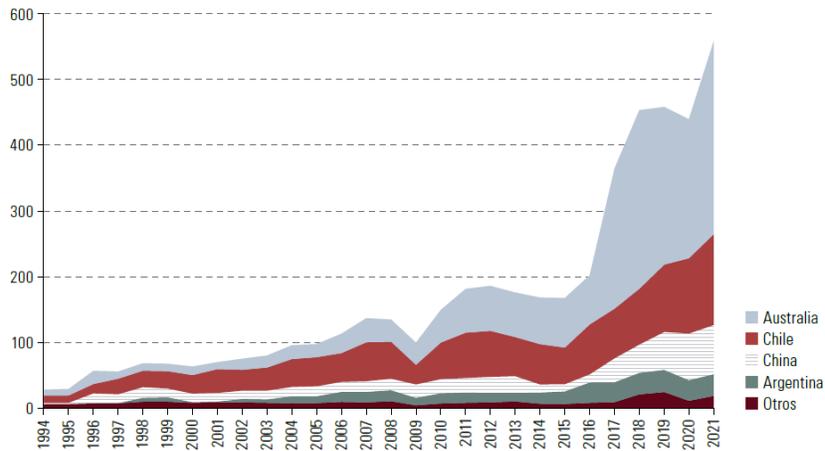


**Figura 4.- Participación mundial en reservas de litio, por país, 2021 (En porcentajes)**

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022

Ese cambio, se debe en especial, a las dificultades que han tenido los países sudamericanos con yacimientos en salmueras para responder con rapidez a una mayor producción de litio por la complejidad de la composición química de los salares. Cada uno de los salares es distinto en lo que respecta a concentraciones de litio e impurezas; en consecuencia, los procesos de extracción deben diseñarse y ajustarse de manera particular para cada uno de los diferentes salares, y no

copiar tecnología ya existente. Los tiempos de desarrollo de las operaciones en salares son más extensos que los que necesita el mineral de roca. La producción de litio se concentra en cuatro países: Australia, Chile, China y Argentina, a los que, en 2021, correspondió más del 96% de la producción mundial, como se aprecia en la figura siguiente:



**Figura 5.- Evolución de la producción mundial de litio, 1994-2021 (En miles de toneladas de carbonato de litio equivalente)**

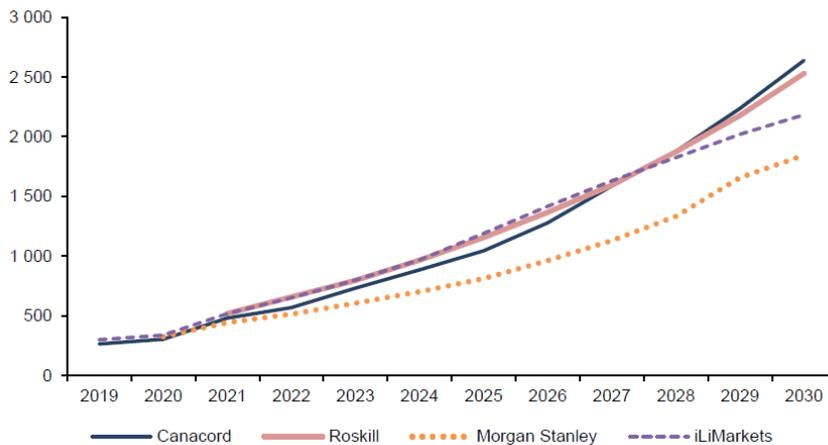
Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

Es decir, el año 2021, la oferta (producción) mundial de litio alcanzó niveles de alrededor de 500 kMT LCE, proviniendo el 46% de minerales australianos, el 36% de salmueras sudamericanas, y el saldo desde China y otras áreas de menor producción.

Los principales productores a nivel global durante el 2021 fueron Albemarle (ALB) y SQM con un 21% y 20% de participación respectivamente, seguidos por Tianqi, Ganfeng, y Pilbara con un 11%, 10% y 8%. La

mayoría de los productores tienen o están desarrollando, una red de múltiples activos productivos en distintas geografías, tanto en extracción como refinación.

La proyección de la demanda de litio puede ser presentada en base a diferentes estudios en la figura siguiente (Roskill, 2021), Canacord (2021) y Morgan Stanley (2021)



**Figura 6.- Proyección de demanda de litio, 2020-2030 (En miles de toneladas)**

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

### 3.- El recurso natural de Litio en el 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 7.- Vista Satelital del Salar de Coipasa. (Google Earth - 2024)

Los análisis químicos de las aguas de los principales ríos afluentes del Salar de Coipasa, dan algunas indicaciones sobre el origen geográfico de los elementos presentes en las salmueras, tal como se muestra en la Tabla 1 (V. Lebrun et al.). Además, como punto de comparación en dicha tabla, se presentan los resultados de los análisis una muestra de

Río Grande en Uyuni (UL-1 de Risacher y Fritz, 1991). El fuerte enriquecimiento del río Lauca con respecto al río Grande en sulfatos es muy notable. La relación Mg/Li mucho mayor en las aguas de Coipasa con respecto a Uyuni es ya notable como se observará también en las salmueras respectivas.

| River     | Code | Cl<br>mg/l | SO <sub>4</sub><br>mg/l | SO <sub>4</sub> *<br>mmol/l | HCO <sub>3</sub><br>mg/l | Na<br>mg/l | K<br>mg/l | K*<br>mmol/l | Li<br>Mg/l | Ca<br>mg/l | Mg<br>mg/l |
|-----------|------|------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|-----------|--------------|------------|------------|------------|
| r. Lauca  | L33  | 191.1      | 146.97                  | 12.8                        | 268.07                   | 154        | 17.2      | 3.7          | 0.48       | 60.0       | 33.5       |
| r. Lauca  | L28  | 585.1      | 417.66                  | 15.8                        | 271.18                   | 484        | 37.6      | 3.5          | 1.1        | 80.0       | 45.6       |
| r. Lauca  | L27  | 954.4      | 409.22                  | 12.2                        | 383.27                   | 808        | 38.7      | 2.8          | 1.4        | 56.4       | 33.7       |
| r. Grande | UL-1 | 1580       | 313                     | 3.3                         | -                        | 908        | 41.9      | 1.1          | 4          | 202        | 56         |

Tabla 1: Análisis químicos de los principales ríos tributarios de Coipasa y Uyuni (V. Lebrun et al., 1997 y Risacher y Fritz, 1991)

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:

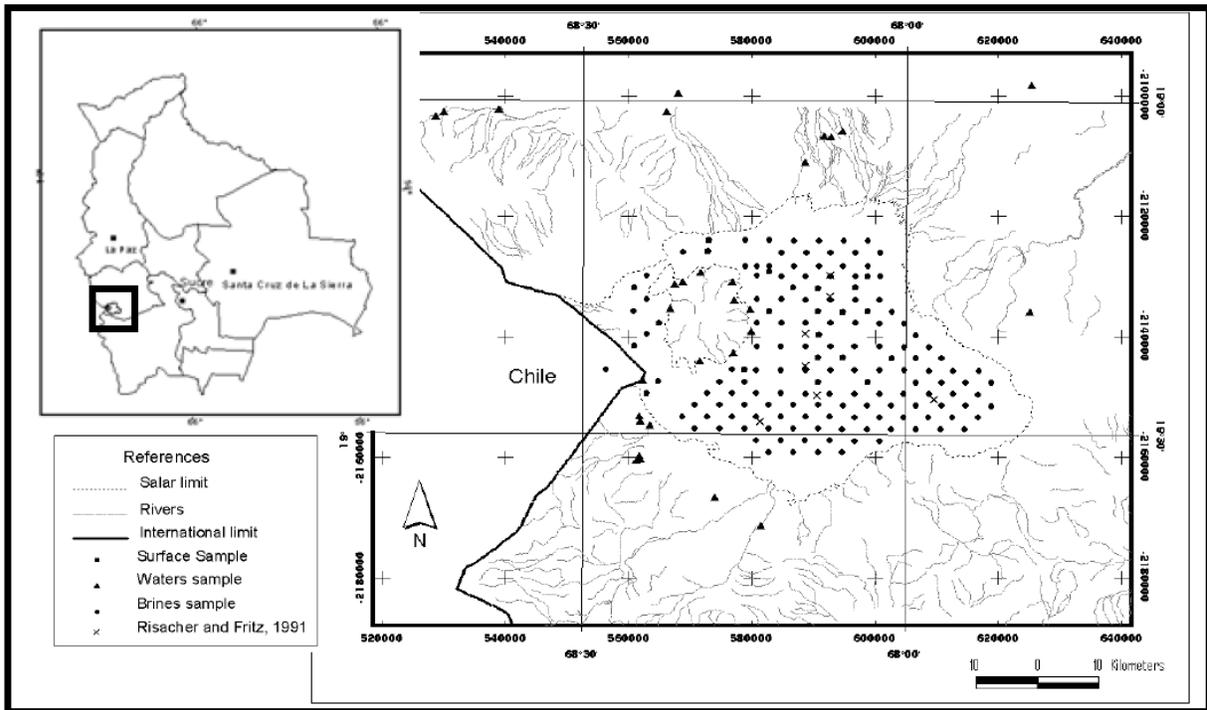


Figura 8.- Localización del Salar de Coipasa en la frontera con Chile y ubicación de las muestras en la corteza salina (V. Lebrun et al., 1997)

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.

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

|       | Mg      | K       | Li    | Ca    | Na    | SO <sub>4</sub> | Cl     |
|-------|---------|---------|-------|-------|-------|-----------------|--------|
| Media | 12806.1 | 11378.1 | 289.8 | 561.4 | 97957 | 13838.4         | 192836 |

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

|        | Mg             | K       | Li           | Ca            | Na             | SO <sub>4</sub> | 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  | <b>14494.7</b> | 9306.1  | <b>339.1</b> | <b>1506.8</b> | <b>99213.9</b> | <b>28193.2</b>  | 186049.2 |

Tabla 2.- Datos estadísticos de las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las salmueras de Coipas 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 9).

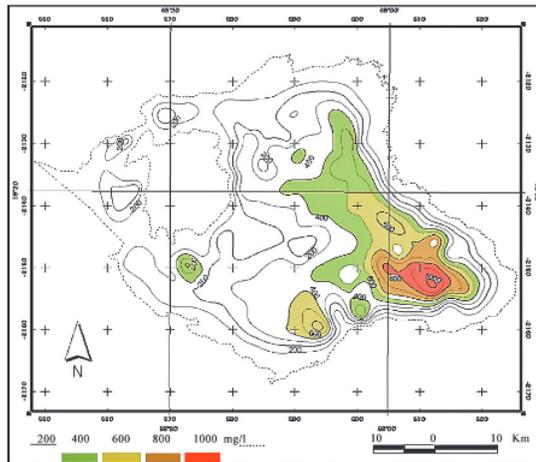


Figura 9.- Curvas de isoconcentraciones de Li en el Salar de Coipasa (V. Lebrun et al., 1997)

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.

#### 4.- Bases técnicas para una propuesta sostenible para la recuperación de Litio de Salmueras de Coipasa

La figura siguiente, muestra los recursos estimados establecidos en varios salares a nivel mundial. Los recursos del Salar de Coipasa, no se encuentran en dicha información.

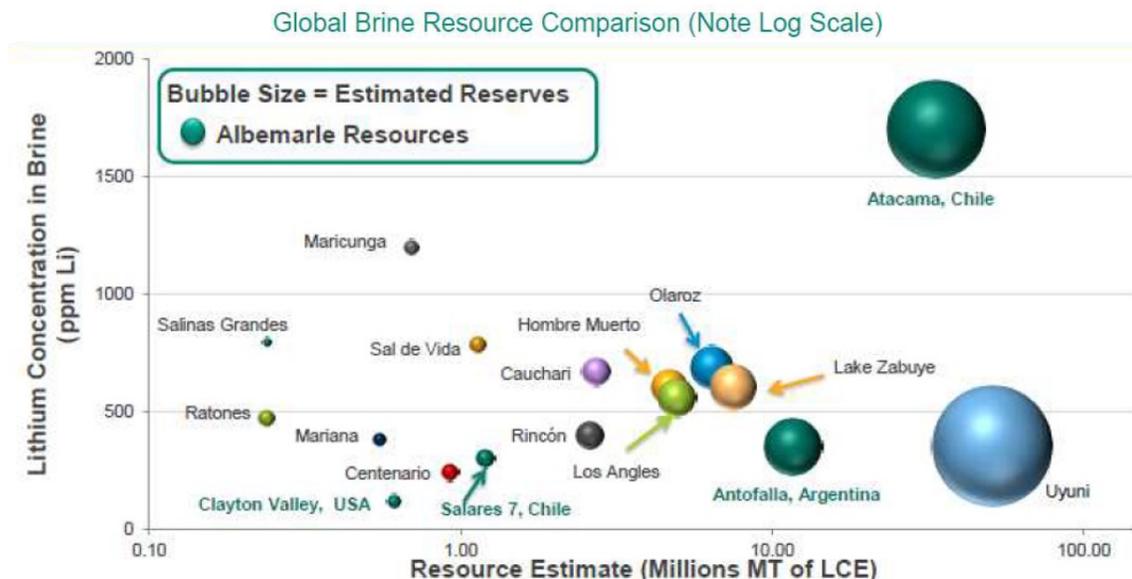


Figura 10.- Recursos estimados establecidos en varios salares a nivel mundial y concentraciones de Li en sus salmueras (Information of Ambermarle Corporation)

El detalle más importante de la figura anterior, es que el Salar de Uyuni, que, si bien es uno de los recursos más grandes en cuanto a tamaño, su concentración de litio es baja comparado con el promedio de Chile o

Argentina. La tabla siguiente, muestra una cuantificación posible de los recursos del Salar de Coipasa, basado en el estudio que se realizó en el Proyecto Coipasa (1997).

| Elemento         | Concentración Media (mg/l) | Recurso en salmueras considerando volumen (1) en millones de toneladas | Recurso en salmueras considerando volumen (2) en millones de toneladas |
|------------------|----------------------------|--|--|
| Ca               | 1506                       | 0.84   | 1.78   |
| Mg               | 14494                      | 4.56   | 9.02   |
| Na               | 99213                      | 34.61  | 70.22  |
| K                | 9306                       | 3.20   | 6.51   |
| Li               | 339                        | 0.20   | 0.30   |
| SO <sub>4</sub>  | 28193                      | 10.47  | 20.15  |
| HCO <sub>3</sub> | 1804                       | 0.63   | 1.26   |
| Cl               | 186049                     | 67.13  | 135.26   |
| B                | 831                        | 0.29   | 0.58   |
| Sr               | 11                         | 0.004  | 0.008  |

Figura 11.- Cuantificación posible de los recursos del Salar de Coipasa - Proyecto Coipasa (1997)

Es decir, los recursos determinados en los dos espesores de volúmenes de costras características en su estratificación en el Salar de Coipasa, ascienden a 0.5 millones de toneladas de Li.

En las figuras siguientes, se muestran las gráficas referidas a las relaciones de concentraciones **Mg/Li** y **SO<sub>4</sub>/Li** presentes en las salmueras de los diferentes salares de interés global.

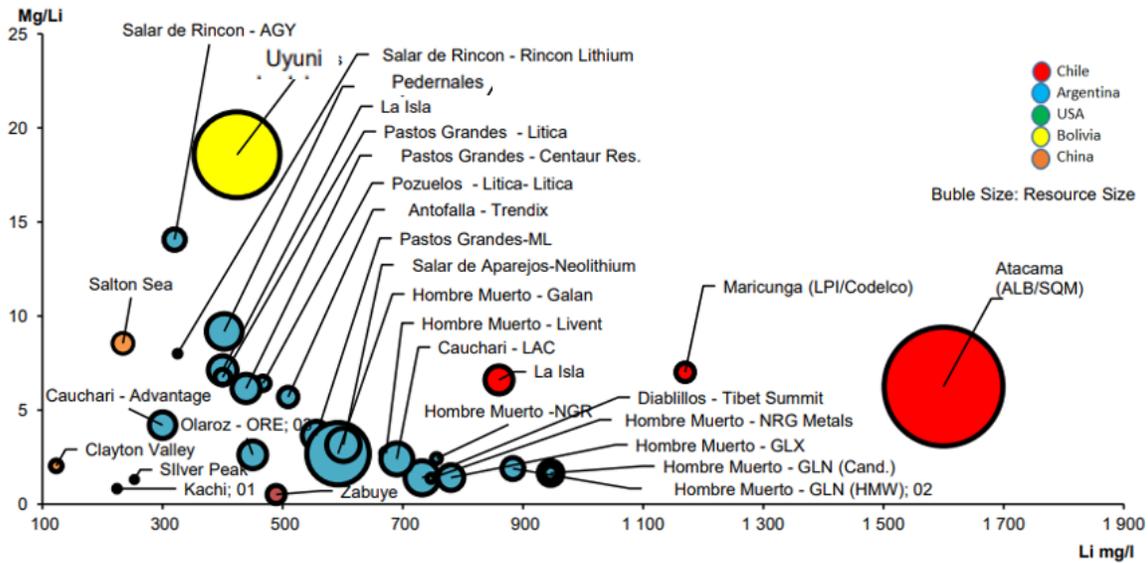
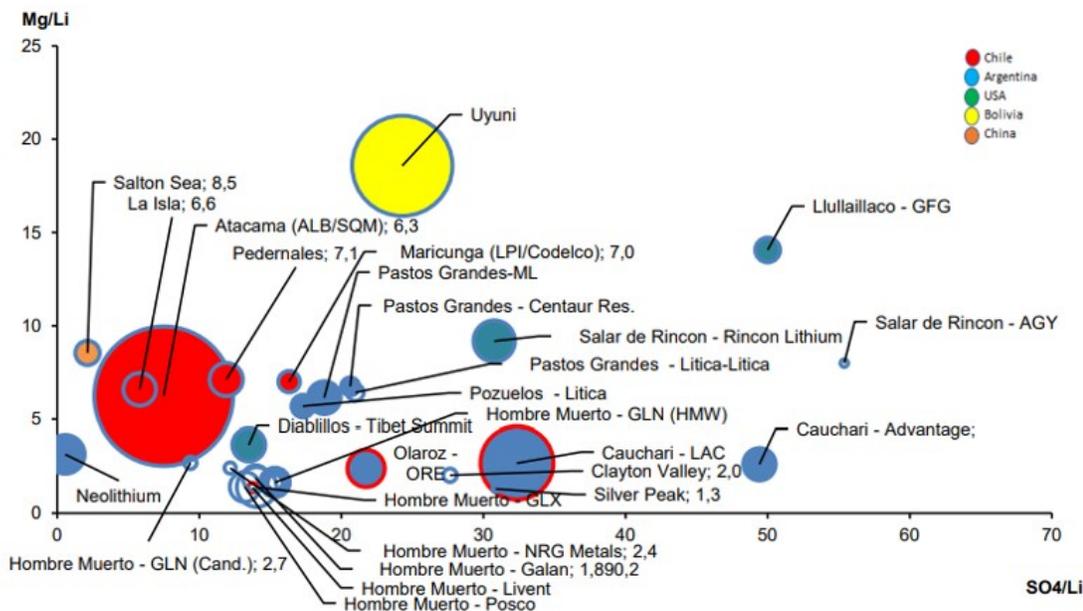


Figura 12.- Relación de concentraciones de Mg/Li vs concentración de Litio presente en salares de interés global. D. Jiménez (2022)

Para el caso de del Salar de Coipasa, la relación de Mg/Li es de 42.74 (28193.2 mg/L de SO<sub>4</sub>/339.1 mg/L de Li)



**Figura 13.- Relación de concentraciones de Mg/Li vs SO4/Li presentes en salares de interés global.** D. Jiménez (2022)

Para el caso del Salar de Coipasa 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 8 y 9, 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 10), 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.

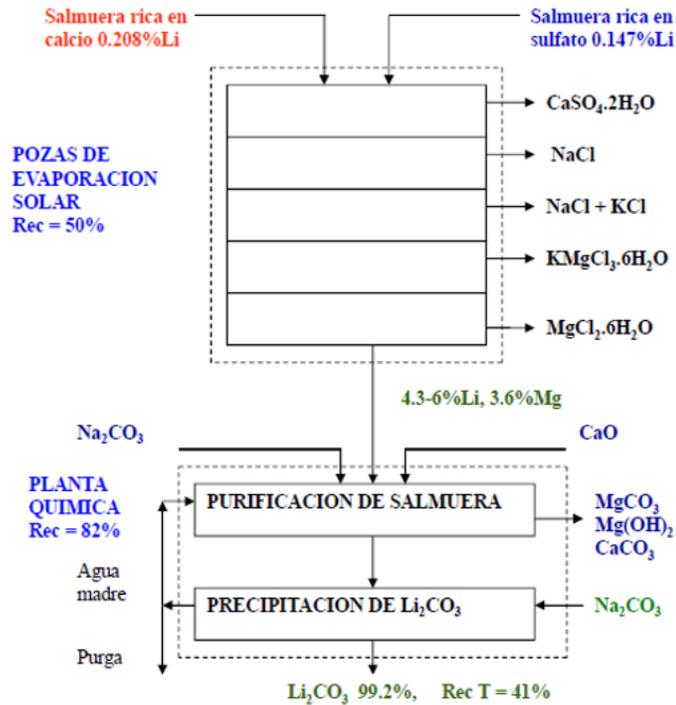


Figura 14.- Flujograma de tratamiento de las salmueras en Ambermarle

El proceso de producción de  $\text{LiCO}_3$  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  $\text{m}^3$  por tonelada de  $\text{LiCO}_3$  producido. La figura 15, 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  $\text{m}^3$ /tonelada de  $\text{LiCO}_3$  producido. 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  $\text{LiCO}_3$  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:
  - 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.
- Disminución o cese de evaporación: un descenso excesivo de los niveles freáticos puede provocar que la evaporación desde la superficie freática cese.

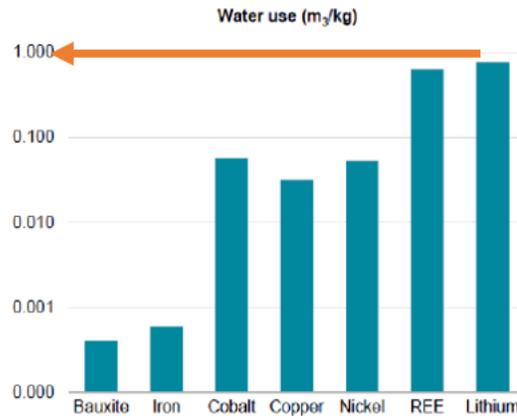


Figura 15.- Consumos de agua requeridos en los procesos de extracción de diferentes metales (IEA análisis base don Farjana)

**5.- Propuesta sostenible para la recuperación de Litio de Salmueras de Coipasa**

En la figura 16, muestra las tasas de extracción de salmueras en función de las concentraciones de Li en las mismas, y los índices de recuperación esperados.

De dicha gráfica anterior se deduce que, a menores concentraciones de Li en las salmueras como las que presenta en Salar de Coipasa, se requieren mayores tasas de extracción y con menores recuperaciones de Li en los procesos convencionales de extracción.

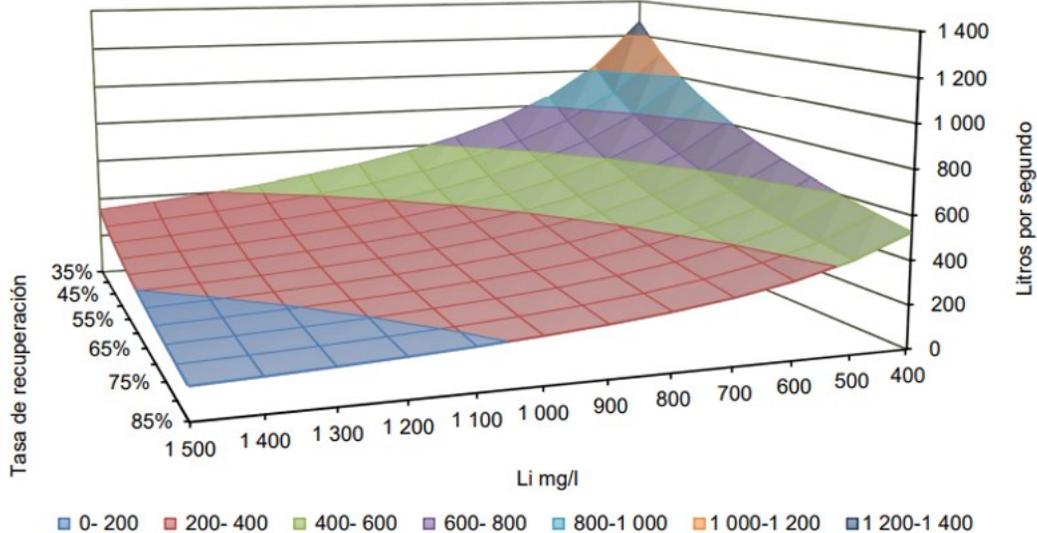
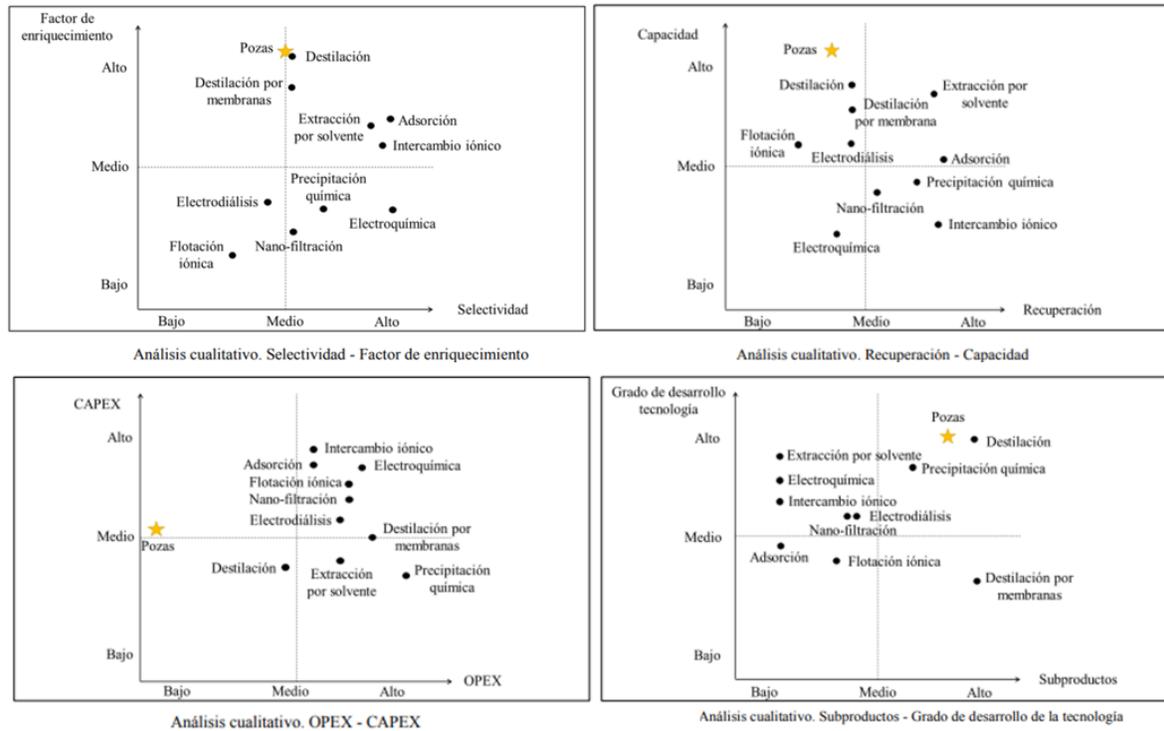


Figura 16.- Tasas de extracción de salmueras en L/s y en función de las concentraciones de Li en las mismas, y los índices de recuperación esperados. D. Jiménez (2022)

La figura 17, 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; donde se establece que la obtención de LiCO<sub>3</sub> 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 con un

grado de tecnología industrializado; por el contrario, las nuevas tecnologías de extracción directa de Litio, como la extracción por solventes, la adsorción y el intercambio iónicos, presentan menores factores de enriquecimiento y menores capacidades de producción que las pozas; mayores costos de inversión y procesos a la fecha han sido menos desarrollados industrialmente.



**Figura 17.- 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).**

Las elevadas relaciones de Mg/Li y SO<sub>4</sub>/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

El clima actual en el Altiplano es árido a semiárido, con de 800 a 1.000 mm/año en el norte, cerca del lago Titicaca y <100 mm/año en el sur, cerca del Salar de Uyuni. La mayor parte de las precipitaciones se producen durante el verano austral, de diciembre a marzo, con una larga estación seca de abril a noviembre. La precipitación media anual en el Salar de Coipasa es de 100-200 mm/año. El principal afluente del Salar de Coipasa es el Río Lauca, con una descarga anual de  $0,14 \times 10^9 \text{ m}^3$  (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia), que hoy en día a menudo crea un lago en la parte Norte del Salar de Coipasa cercana a la desembocadura del río. Normalmente, la superficie del salar se inunda durante la estación lluviosa y luego se seca casi por completo durante la siguiente estación seca. La temperatura media diurna está entre 21°C y 24°C durante el día; y

durante noche baja a entre 9°C y 15°C en época de verano. Además, llueve cerca de 29 días y hay un total aproximado de 45 mm precipitaciones; condiciones desfavorables para la aplicación de piscinas de evaporación-cristalización.

La figura 18, muestra el área requerida por las piscinas de evaporación-cristalización para producciones por encima de las 10 ktpa de LiCO<sub>3</sub> 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. 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).

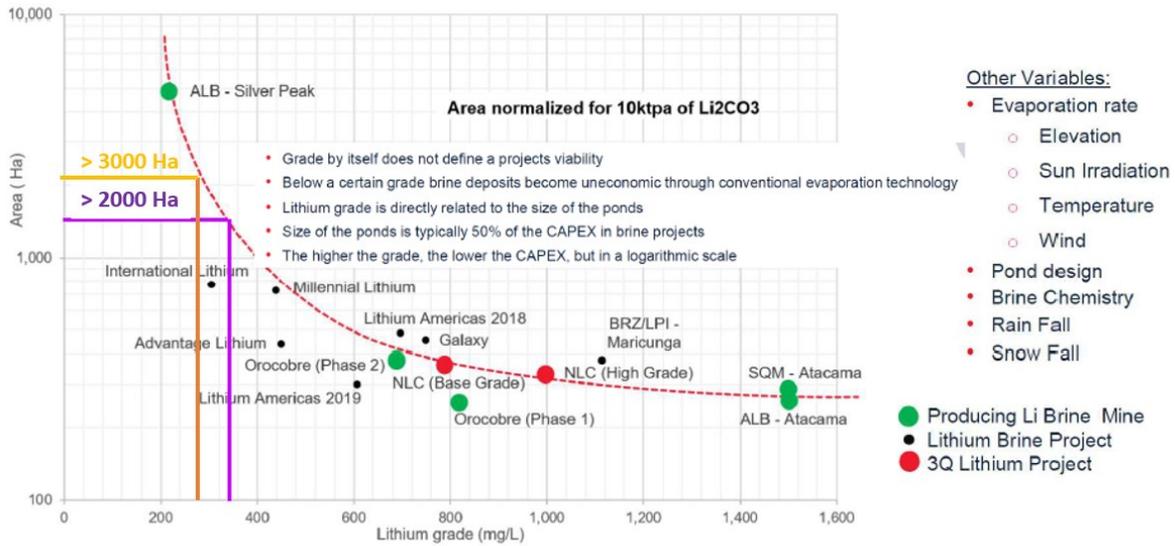


Figura 18.- Área requerida estimada en piscinas de evaporación-cristalización que se encuentran en operación (3 Quebradas Lithium Project Corporate Presentation)

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

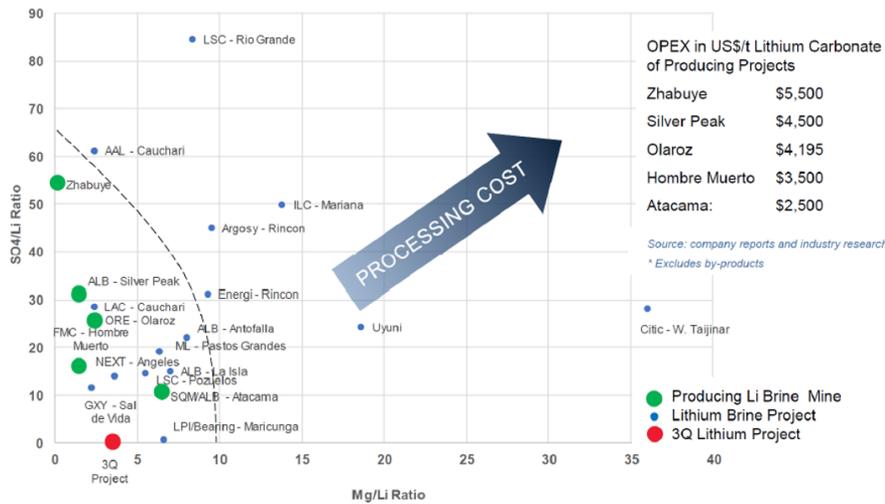


Figura 19.- Costos comparativos del procesamiento de salmueras basado en las experiencias de la explotación (3 Quebradas Lithium Project Corporate Presentation)

De la figura anterior es posible colegir que cuanto mayor sea la relación de Mg/Li y SO<sub>4</sub>/Li, como es el caso de las salmueras de Coipasa, los costos de procesamiento de salmueras son mayores.

La tabla siguiente muestra datos de las composiciones químicas de salmueras de algunos salares, en las que se incluyen las del Salar de Uyuni y de Coipasa, resaltando las salmueras en China que son objeto de procesamiento industrial.

| Salares           | País/<br>Promotor                 | Composición química(%) |                  |                 |                 |                  |                 |                               | Relación<br>de<br>magnesio<br>sobre litio | Tipo de salar                  |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------------------|---|--------------------------------|
|                   |                                   | K <sup>+</sup>         | Mg <sup>2+</sup> | Li <sup>+</sup> | B <sup>3+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |   |                                |
| Atacama           | Chile/SQM,<br>ALB                 | 6.4                    | 0.96             | 0.15            | 0.06            | 0.03             | 16.04           | 1.65                          | 6.4                                       | Subtipo de sulfato de magnesio |
| Hombre Muerto     | Argentina/<br>Livient             | 1.37                   | 0.09             | 0.06            | 0.04            | 0.05             | 15.8            | 0.85                          | 1.37                                      | Subtipo de sulfato de sodio    |
| Salar de Cauchari | Argentina/<br>Lithium<br>Americas | 0.47                   | 0.131            | 0.05            | 0.08            | 0.03             | 14.86           | 1.62                          | 2.52                                      | Tipo de sulfato                |
| Qarhan            | China/Salt<br>Lake Stock          | 1.87                   | 5.17             | 0.01            | 0.01            | 0.04             | 19.34           | 0.54                          | 517-1577                                  | Tipo cloruro                   |
| Taijinar Oeste    | China/CITIC<br>GUOAN              | 1.04                   | 2.31             | 0.03            | 0.13            | 0.02             | 18.97           | 2.58                          | 67.9                                      | Subtipo de sulfato de magnesio |
| Uyuni             | Bolivia/YLB                       | 1.55                   | 1.11             | 0.06            | 0.02            | 0.12             | 16.7            | 0.7                           | 18.5                                      | Subtipo de sulfato de magnesio |
| Coipasa           | Bolivia/YLB                       | 1.44                   | 1.72             | 0.05            | 0.12            | 0.02             | 14.26           | 4.51                          | 34.5                                      | Subtipo de sulfato de magnesio |
| Pastos grande     | Bolivia/YLB                       | 0.79                   | 0.26             | 0.12            | 0.05            | 0.004            | 13.81           | 0.24                          | 2.2                                       | Tipo cloruro                   |



Tabla 3.- Composiciones químicas de salmueras de algunos salares que se incluyen al Salar de Uyuni y de Coipasa.

Además, en la tabla anterior, se muestran los principales retos técnicos para la extracción de litio de las salmueras consideradas. Es importante resaltar que las salmueras de Taijinar Oeste, presentan características bastante similares a las del Salar de Coipasa en cuanto a relaciones elevadas de Mg/Li y

también de SO<sub>4</sub>/Li, y que, por Extracción Directa de Litio, son procesadas industrialmente. Por otra parte, la tabla siguiente, muestra tecnologías industriales de extracción de Litio que son aplicadas para diferente tipo de salmueras.

| Tecnologías de extracción de litio aplicadas industrialmente |  |                                |                      |
|--|--|--------------------------------|----------------------|
| Tecnología   | Proyecto                                     | Tipo de recuso                 | Materia prima        |
| Método de precipitación                                      | Atacama, Silver Peak (SQM, ALB)              | Tipo sulfato                   | Salmuera concentrada |
|  | Cauchari Olaroz (ORE, LAC)                   | Tipo sulfato                   | Salmuera concentrada |
| Método de adsorción  | Hombre Muerto (Livent)                       | Subtipo de sulfato de sodio    | Salmuera concentrada |
|  | Qarhan (Salt Lake Stock)                     | Tipo cloruro                   | Salmuera concentrada |
| Adsorción+método de membranas                                | Taijinar Oeste (CITIC GUOAN)                 | Subtipo de sulfato de magnesio | Salmuera cruda       |
| Electrodiálisis  | Taijinar Este (Participación de CITIC GUOAN) | Subtipo de sulfato de magnesio | Salmuera concentrada |
| Separación de membranas                                      | Yiliping (Wukuang de China)                  | Subtipo de sulfato de magnesio | Salmuera concentrada |
|  | Taijinar Oeste (CITIC GUOAN)                 | Subtipo de sulfato de magnesio | Salmuera concentrada |
| Método de extracción con disolvente                          | Salar de Dachaidan /Xinghua Litio            | Tipo sulfato                   | Salmuera concentrada |

Tabla 4.- Tecnologías industriales de extracción de Litio que son aplicadas para diferente tipo de salmueras

Se destaca la tecnología de adsorción y membranas que es usada para la extracción de litio de la salmuera de Taijinar Oeste, con similitudes a la del Salar de Coipasa.

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 SO<sub>4</sub>/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 selectivos en la remoción del litio presente en las salmueras (mayor eficiencia).
- Son más rápidos 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)

Por tanto, se propone un flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa que contempla las etapas siguientes:

- Enriquecimiento de Li 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 osmosis 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 y separación de la salmuera residual del Mg, Ca y B remanentes por precipitación - filtración.
- Recuperación del  $\text{LiCO}_3$  por precipitación de la salmuera residual a  $75^\circ\text{C}$ .

El flujograma propuesto se presenta en la figura siguiente:

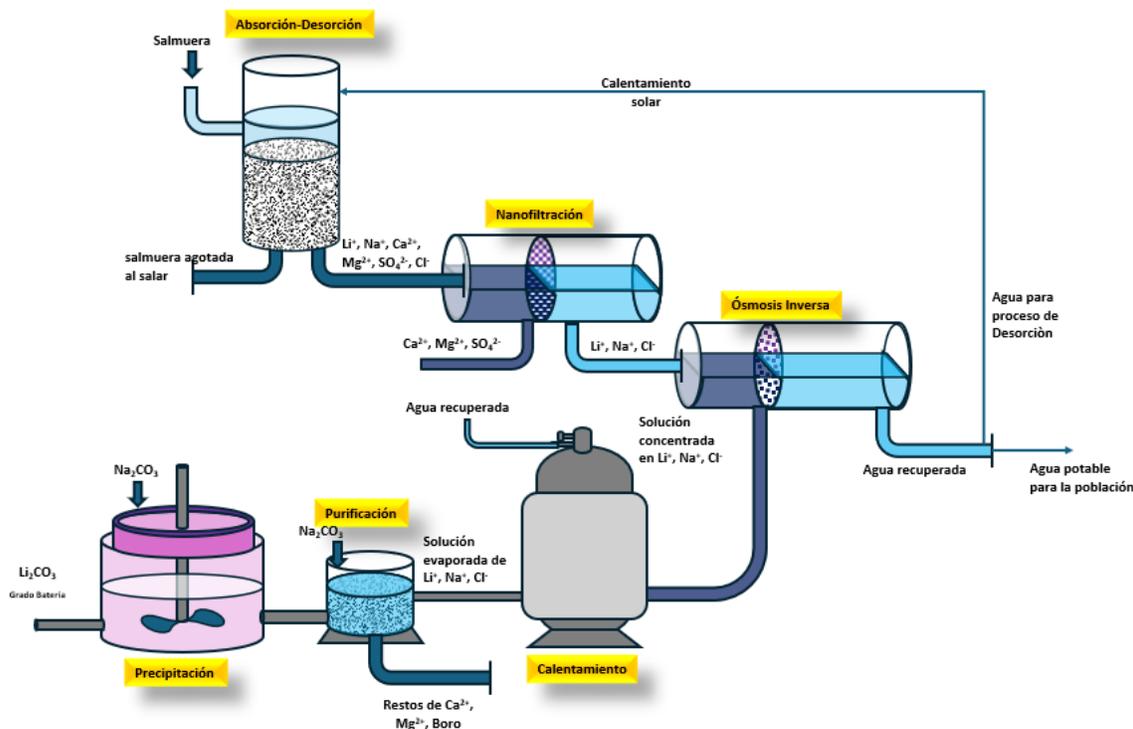


Figura 20.- Propuesta de flujograma para la extracción directa de Li de las salmueras de Coipasa

## 6.- Conclusiones

- Las relaciones de Mg/Li y de  $\text{SO}_4/\text{Li}$  de las salmueras de Coipasa son de 42.74 y 83.14; valores demasiado 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 Coipasa 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 m<sup>3</sup>/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.
- El proceso de adsorción – desorción, membranas y ósmosis inversa, se constituiría en el proceso más adecuado para la obtención de LiCO<sub>3</sub> de las salmueras del salar de Coipasa, zona de alta escases hídrica.

## REFERENCIAS

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. FRITZB, 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. & ERICKSEN, 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”

Garrett, D. E. (2004). “Handbook of lithium and natural calcium chloride”.

RISACHER F., FRITZ B. (1991), Quaternary geochemical evolution of the salars de Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia, *Chemical Geology*, 90, 211-231

Canaccord Genuity, Global Equity Research (2021), “Rating and Target Price Changes, EV Materials”.

MORGAN STANLEY (2021), “The New Oil: Investment Implications of the Global Battery Economy”, Bluepaper [Reporte de Investigación].

Rosskill (2021), Lithium 18th Edition Update October 2021.

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.

B. Jones, F. Acuña y V. Rodríguez. (2021), “Cadena de valor del litio: análisis de la cadena global de valor de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos”, Documentos de Proyectos LC/TS.2021/86), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

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.

AMBERMARLE. <https://www.albemarlelitio.cl/>

Artículo recibido en: 17.05.2024

Manejado por: Elvys Trujillo L.

Artículo aceptado: 10.06.2024