

# Artículos

## Litio en salares: una fórmula muy andina

Romina L. López Steinmetz<sup>1,2\*</sup>, Pablo J. Caffè<sup>1</sup>, Carisa Sarchi<sup>1,2</sup>,  
M. Gabriela Franco<sup>1,2</sup>, Ornela E. Constantini<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ecoregiones Andinas (UNJu-CONICET), Jujuy

<sup>2</sup>Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy

\*lucrecialopezsteinmetz@conicet.gov.ar

La relación entre el litio y los salares parece una receta de cocina, en la que los ingredientes son agua, sal, aridez y aislamiento, se condimenta con un poco de litio y se deja macerar – apenas – algunos millones de años. Esto es lo que se requiere para que se forme un salar que tenga el potencial de ser aprovechado para la extracción de litio. Esta receta, claro, es bastante excepcional ya que la inhabitual confluencia de estos ingredientes se da naturalmente en pocos lugares del planeta Tierra. Para nuestro deleite, el plateau andino, la región sobre elevada que incluye a la Puna argentino-chilena y al Altiplano boliviano, es una de esas raras partes del globo donde esta receta prospera.

El litio (Li) es un elemento químico que existe naturalmente en el planeta. Si bien tiene diversas e importantes aplicaciones, su relevancia económica creció cuando comenzó a utilizarse para fabricar baterías de celulares y computadoras, así como de autos eléctricos. Particularmente en la región de los Andes, el litio se recupera a partir de las salmueras (agua con una concentración superior a 5 % de sales disueltas) que están en el subsuelo de los salares, en las que este metal se encuentra disuelto de igual modo que la sal de mesa se disuelve en el agua (para más detalles sobre la recuperación y los usos del litio, véase la nota publicada en esta revista por de la Hoz et al. 2013).

Los salares (y/o salinas, ya que son términos equivalentes) son depósitos de sal formados en áreas aisladas, donde el clima árido genera la evaporación paulatina del agua, lo cual da lugar a que las sales que estaban disueltas precipiten, acumulándose gradualmente a lo largo de mucho tiempo. Los salares están entonces constituidos de una acumulación de sales precipitadas a raíz de la evaporación (Fig. 1).



Figura 1. Las Salinas Grandes.

El agua que aún no se evaporó completamente es salobre (es decir, algo salada). Cuando los ríos llegan a un salar, el agua se almacena en su interior. Como en este ambiente el agua está en contacto con las sales, se vuelve, previsiblemente, salada. Justamente, esta agua salada contenida entre las sales y los sedimentos de las cuencas salinas es la que constituye las salmueras que, en el caso de los Andes, son las que almacenan altas concentraciones de litio. De este modo, la minería andina del litio consiste en el aprovechamiento de las salmueras de los salares (Figs. 2 y 3).



Figura 2. Superficie salina (izquierda) y pozas de evaporación de salmuera para recuperación de litio (derecha) en el salar de Olaroz.

En el plateau andino existen numerosos salares (Fig. 4). Solo en la parte argentina del plateau existen más de 20 cuerpos salinos que merecen interés en términos de su potencial litífero. Este potencial se define en virtud de una serie de características, entre las cuales abordaremos las dos más elementales: la concentración de litio y el tamaño del salar. La concentración de litio en una salmuera representa la cantidad de este elemento (generalmente en miligramos) que está disuelta en un litro de salmuera. Desde ya que, mientras mayor sea la concentración de litio en la salmuera, mayor será la importancia del salar en términos económicos. Cuando las concentraciones de litio en las salmueras son lo suficientemente interesantes, otro aspecto que favorece la relevancia económica de un salar es su tamaño, ya que mientras más grande sea el cuerpo de sal, mayor será el volumen de salmuera contenido y, por ende, la cantidad de litio presente. Detallaremos a continuación estos dos rasgos para algunos de los más importantes prospectos de litio en los Andes de Bolivia, Chile y Argentina (Tabla 1).



Figura 3. Poza de evaporación de salmuera para recuperación de litio en el salar de Olaroz.

Salar	Superficie (km <sup>2</sup> )	Altitud (m snm)	Promedio [Li] (mg/L)
Uyuni	10580	3660	300 – 600
Atacama	3000	2305	1400
Hombre Muerto	300	3970	520
Olaroz	130	3900	1000
Cauchari	80	3900	860
Salinas Grandes	280	3410	330

Tabla 1. Atributos comparativos de algunos salares andinos. Modificado de López Steinmetz et al. (2018).

## LOS GIGANTES DE UYUNI Y ATACAMA:

Los mayores recursos de litio a escala global se encuentran en los salares de Uyuni y Atacama (Moraga et al. 1974; Gruber y Medina 2010; Mohr et al. 2010; Kunasz 2006; Kesler et al. 2012; Munk et al. 2016). Uyuni es un salar espectacularmente gigante. Tiene una superficie de más de 10500 km<sup>2</sup>, y si bien no es precisamente rectangular, corresponde a un área de unos 100 km de ancho en sentido oeste-este por unos 100 km de largo en sentido norte-sur. Uyuni es “El” salar más grande de los Andes y del planeta Tierra. Este salar está ubicado a 3660 m de altura en el Altiplano boliviano (Fig. 4). Como en todos los salares, la concentración de litio en las salmueras de Uyuni varía espacialmente (a lo largo y ancho, así como en profundidad). El contenido promedio de litio en las salmueras poco profundas (cercanas a la superficie del salar) varía entre 300 y 600 mg/L, y el patrón de concentración de litio en Uyuni aumenta hacia el sur (Ericksen et al. 1976; 1977; Rettig et al. 1980; Risacher y Fritz 1991; Schmidt 2010). Los recursos de litio estimados en Uyuni son de más de 10 millones de toneladas, lo que equivale aproximadamente a 12 veces el yacimiento australiano de Greenbushes de fama mundial (Kesler et al. 2012), que es ni más ni menos el mayor depósito de litio en roca (no salar).

Aunque Uyuni tiene los mayores recursos de litio del mundo, este salar aún no está en producción. Gran parte del litio que se produce mundialmente en la actualidad se obtiene del Salar de Atacama. Con recursos estimados en algo más de 6 millones de toneladas, el Salar de Atacama es “La” mina de litio más importante del mundo (Moraga et al. 1974; Ide y Kunasz 1989; Kunasz 2006; Lowenstein y Risacher 2009; Gruber y Medina 2010; Mohr et al. 2010; Kesler et al. 2012; Cochilco 2013).

El Salar de Atacama tiene una superficie de 3000 km<sup>2</sup> y está ubicado en el norte de Chile, a 2300 m de altura (Fig. 4). Su concentración promedio de litio es de unos 1400 mg/L, y varía en un rango de entre 1000 y 6400 mg/L (Moraga et al. 1974; Ide y Kunasz 1989; Kunasz 2006). La concentración de litio en las salmueras del Salar de Atacama representa el máximo tenor registrado en todo el mundo hasta la fecha. El patrón de concentración de litio en este salar aumenta hacia su parte sur (Ide y Kunasz, 1989).

## EL LITIO ARGENTINO

-En la Puna argentina, que es la parte sur del plateau andino, también existen destacados prospectos (zonas con recursos minerales potencialmente valiosos) de litio. Entre ellos está el Salar de Hombre Muerto (Fig. 4), que se convirtió en la primera mina de litio en Argentina al iniciar su producción en los años 90 (Kesler et al. 2012; Fornillo et al. 2015). El salar de Hombre Muerto tiene una superficie de 300 km<sup>2</sup> y está ubicado a 3970 m de altitud. Los recursos estimados de litio en este salar son de algo menos de 1 millón de toneladas. La concentración promedio de litio en las salmueras es de unos 520 mg/L, y el patrón de concentración aumenta hacia el sur (Garrett 2004; Kesler et al. 2012; Godfrey et al. 2013).

Hacia el norte, siempre en territorio argentino, están los salares de Olaroz y Cauchari. Estos dos salares están ubicados en una misma cuenca alargada en sentido norte-sur, que se sitúa a una altitud promedio de 3900 m (Fig. 4). Los extremos norte y sur de la cuenca hidrológica están alimentados por numerosos manantiales hidrotermales (Aguilera Barraza 2008; Peralta Arnold et al. 2017), donde los colectores principales son los ríos Rosario y Tocomar, respectivamente. El otro afluente importante es el río Archibarca, que desemboca en el borde oeste del salar, donde forma un enorme abanico aluvial que divide la depresión topográfica Olaroz - Cauchari en dos partes, y actúa como una barrera entre el Salar de Olaroz al norte y el de Cauchari al sur.

El Salar de Olaroz (Fig. 4) tiene una superficie de 130 km<sup>2</sup>, la concentración de litio en las salmueras someras varía de 770 a 1200 mg/L y las concentraciones promedio son de unos 1000 mg/L de litio (Franco et al. 2017; López Steinmetz et al. 2018). El Salar de Cauchari tiene unos 80 km<sup>2</sup> de extensión, la concentración de litio en las salmueras varía entre 440 y 1700 mg/L, resultando en concentraciones promedio de unos 860 mg/L (López Steinmetz et al. 2018). Las salmueras de estos dos salares son cloruradas sódicas y los tenores de sal disuelta superan los 360 gramos de sal por litro de salmuera. Las mayores concentraciones de litio se encuentran en la parte de central de cada salar.

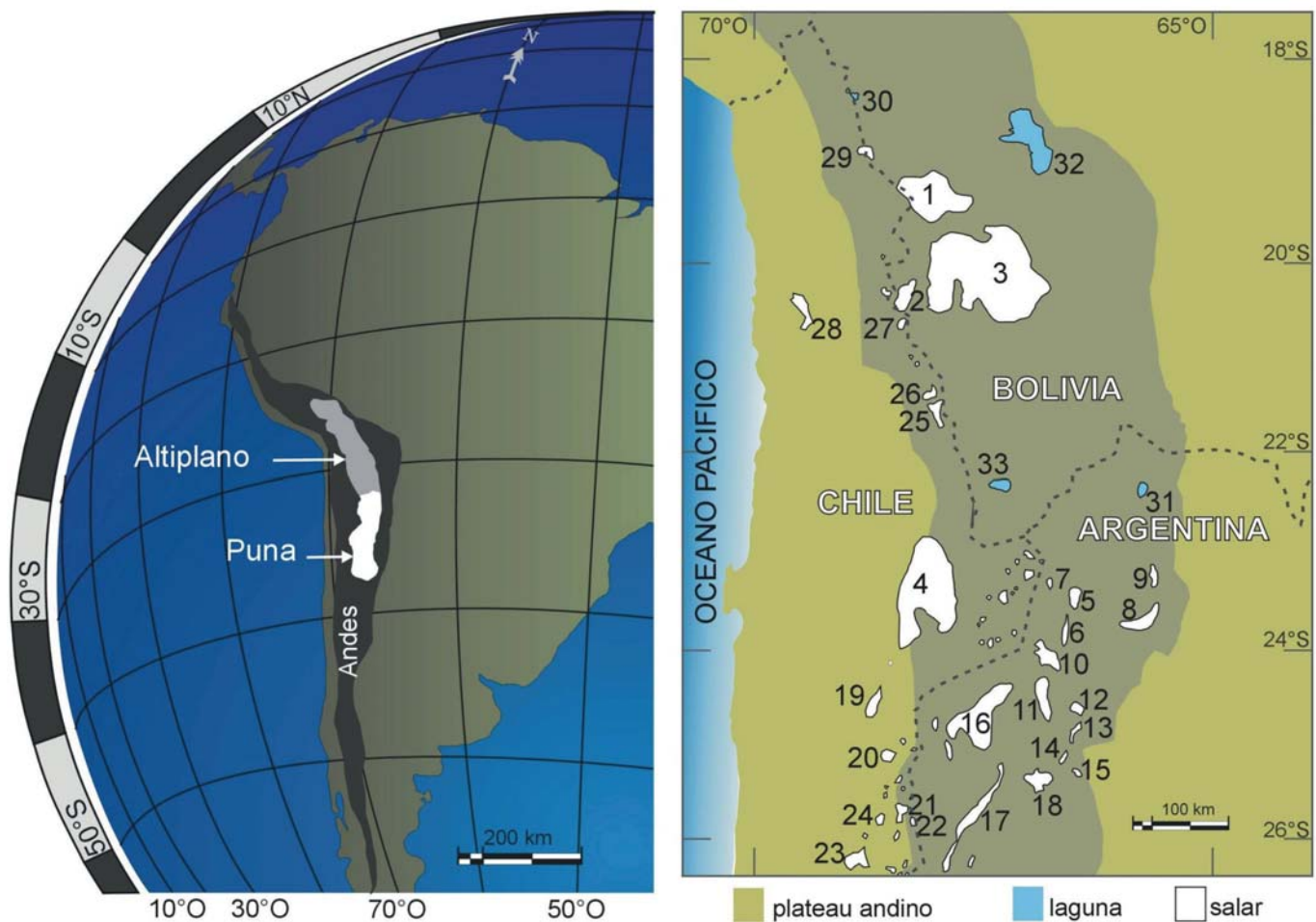


Figura 4. Ubicación de la Puna y el Altiplano en el contexto de la Cordillera de los Andes (izquierda). Ubicación de algunos salares y lagunas litíferos del plateau andino (derecha). 1: Coipasa, 2: Empexa, 3: Uyuni, 4: Atacama, 5: Olaroz, 6: Cauchari 7: Jama, 8: Salinas Grandes, 9: Guayatayoc, 10: Rincón, 11: Pocitos, 12: Pastos Grandes, 13: Centenario, 14: Ratonés, 15: Diablillos, 16: Arizaro, 17: Antofalla, 18: Hombre Muerto, 19: Punta Negra, 20: Pajonales; 21: La isla, 22: Las Parinas, 23: Pedernales, 24: Aguilar, 25: Ascotán, 26: Carcote, 27: Coposa, 28: Pintados, 29: Surire, 30: Chungara, 31: Laguna de Pozuelos; 32: Lago Poopó, 33: Laguna Colorada.

Otro salar importante es Salinas Grandes, su superficie es de alrededor de 280 km<sup>2</sup> y está situado a 3410 m de altura. Este salar está ubicado al sur del abanico aluvial del río Las Burras, que separa a Salinas Grandes de la Laguna de Guayatayoc (Fig. 4). Los cursos permanentes que alimentan las Salinas Grandes incluyen los ríos San Antonio de los Cobres y El Moreno. Las áreas de captación del sur, como las cabeceras del río San Antonio de los Cobres y el río Pastos Chicos incluyen numerosos manantiales hidrotermales (Giordano et al. 2013; 2016), mientras que el área de cabecera de la cuenca El Moreno involucra procesos periglaciales estacionales y cantidades relativamente grandes de precipitaciones (aprox. 700 mm / año) en comparación con la parte occidental de la cuenca y el resto de la Puna (aprox. 300 mm / año).

En las Salinas Grandes las salmueras tienen tenores salinos que aumentan hacia el oeste hasta superar 240 g/L (López Steinmetz 2017; López Steinmetz et al. 2018). Las salmueras son principalmente cloruradas sódicas y su concentración promedio de litio es de unos 330 mg/L. Las concentraciones de litio varían a través del salar en el rango entre 25 y 1000 mg/L, dispuestas en un patrón que es solidario al incremento de la salinidad, lo cual resulta en concentraciones de litio que aumentan hacia el margen oeste del salar.

Un sabio refrán que surgió en la antigüedad, atravesó los siglos y aún hoy se mantiene vigente, dice que el conocimiento es poder. Saber lo que tenemos y ser conscientes de su valor es el primer paso a dar, cualquiera sea la dirección en la que decidamos avanzar. Ahora que comprendemos la relevancia económica que tienen los salares, podemos preguntarnos ¿cuál es la porción que la naturaleza destinó al ser humano en esta receta tan generosa? Tenemos, por un lado, la fortuna de ser contemporáneos con una creciente necesidad tecnológica en la que el litio es un elemento fundamental, y, por otro, de habitar esta tierra que ofrece recursos tan poco frecuentes en el globo. El desafío es descubrir una forma con la que podamos aprovechar estos recursos naturales, para valernos de la oportunidad histórica que impone el momento tecnológico presente, a la vez que se pueda generar prosperidad colectiva sin descuidar al planeta y al ambiente. Vaya, sin dudas que ese es un gran desafío, y debemos trabajar para encontrar las respuestas que necesitamos para resolverlo. Debemos guardar en mente que estos recursos existen gracias a una sofisticada combinación entre clima, tiempo y geología, y que la Tierra es el patrimonio más inestimable que legaremos a las generaciones futuras.

## LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LITIO DE NUESTRO EQUIPO:

Dinámica y evolución de los ambientes evaporíticos de la Puna de Jujuy: factores y procesos que controlan la distribución de Li y B. PIO 14020140100010CO.

De la dinámica y evolución de los salares de la Puna y su control en la exploración y explotación de Li a la extracción por tratamiento electroquímico de las salmueras. PICT-3654.

Litio Argentino: desde su génesis geológica y extracción hasta baterías de última generación dentro una estrategia sustentable. FITR Fonarsec - Industria.

Procesos de movilización y almacenamiento de litio en sistemas endorreicos de la Puna jujeña. Secretaria de Ciencia, Técnica y Estudios Regionales, Universidad Nacional de Jujuy.

## AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen al Dr. Alex Losada Calderón (COO de Orocobre Ltd) por consentir la divulgación de fotografías de las operaciones de Sales de Jujuy en el salar de Olaroz.

## REFERENCIAS

- Aguilera Barraza F (2008) Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la Zona Volcánica Centra (CVZ) entre los 17°43'S y 25°10'S. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. Universidad Católica del Norte, 387 p.
- COCHILCO (2013) Compilación de informes sobre mercado internacional del litio y el potencial del litio en salares del norte de Chile, <http://www.cochilco.cl/estudios/info-litio.asp>
- de la Hoz M., Martínez V.R., Vedia J.L., 2013. El litio: desde los salares de la Puna a nuestros celulares. *Temas de Biología y Geología del NOA*, 3 (3), 58-67.
- Ericksen GE, Chong G, Vila T (1976) Lithium resources of salars in the Central Andes. In: Vine JD (ed.), *Lithium Resources and requirements by the Year 2000*. Geological Survey Professional Paper, 1005, 66-74.
- Ericksen GE, Salas R (1977) *Geology and resources of salars in the central Andes*. U.S. Geological Survey, Open File Repository 88-210, 51 p.
- Fornillo B, Zícarí J, Slipak AM, Puente F, Argento M (2015) *Geopolítica del litio: industria, ciencia y energía en Argentina*. Ed. El Colectivo CLACSO, Buenos Aires, 212 p.
- Franco MG, Borda L, García MG, López Steinmetz RL, Flores P, Córdoba F (2016) Geochemical and sedimentological characterization of the Salar de Olaroz, northern Argentinean Puna, Central Andes. 3rd International Workshop on Lithium, Industrial Minerals and Energy, Jujuy, Argentina.
- Garrett DE (2004) *Handbook of lithium and natural calcium chloride: their deposits, processing, uses and properties*. Elsevier Academic Press, 1st edition.
- Giordano G, Pinton A, Cianfarra P, Baez W, Chiodi A, Viramonte J, Norini G, Gropelli G (2013) Structural control on geothermal circulation in the Cerro Tuzgle-Tocomar geothermal volcanic area (Puna plateau, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 249, 77-94.
- Giordano G, Ahumada F, Aldega L, Becchio R, Bigi S, Caricchi C, Chiodi A, Corrado S, De Benedetti AA, Favetto A, Filipovich R, Fusari A, Gropelli G, Invernizzi C, Maffucci R, Norini G, Pinton A, Pomposiello C, Tassi F, Taviani S, Viramonte J (2016) Preliminary data on the structure and potential of the Tocomar geothermal field (Puna plateau, Argentina). *Energy Procedia*, 97, 202-209.
- Godfrey LV, Chan L-H, Alonso RN, Lowenstein TK, McDonough WF, Houston J, Li J, Bobst A, Jordan TE (2013) The role of climate in the accumulation of lithium-rich brine in the Central Andes. *Applied Geochemistry*, 38, 92-102.
- Gruber P, Medina P (2010) *Global lithium availability: a constraint for electric vehicles?* Master thesis, University of Michigan, 76 p.
- Ide F, Kunasz IA (1989) Origin of lithium in Salar de Atacama, northern Chile, in: Ericksen GE, Cañas Pinochet MT, Reinemund JA (Eds.), *Geology of the Andes and Its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences Series, 11, 165-172.
- Kesler SE, Gruber PW, Medina PA, Keoleian GA, Everson MP, Wallington TJ (2012) Global lithium resources: relative importance of pegmatites, brine and other deposits. *Ore Geology Review*, 48, 55-69.
- Kunasz IA (2006) *Lithium resources*. In *Industrial minerals and rocks, commodities, markets and uses*. 7th edition.
- López Steinmetz RL (2017) Lithium- and boron-bearing brines in the Central Andes: exploring hydrofacies on the eastern Puna plateau between 23° and 23°30'S. *Mineralium Deposita*, 52, 35-50.



López Steinmetz RL, Salvi S, García MG, Peralta Arnold Y, Beziat D, Franco G, Constantini O, Córdoba F, Caffè PJ, 2018. Northern Puna-scale survey of Li-brine deposits in the Andes of NW Argentina. *Journal of Geochemical Exploration*, 180, 26-38.

Lowenstein T, Risacher F (2009) Closed basin brine evolution and the influence of Ca–Cl inflow waters. Death Valley and Bristol Dry Lake, California, Qaidam Basin, China, and Salar de Atacama, Chile. *Aquatic Geochemistry*, 15, 71-94.

Mohr S, Mudd G, Giurco D (2010) Lithium Resources and Production: a critical global assessment. Prepared for CSIRO Minerals Down Under Flagship, by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology, Sydney, and Department of Civil Engineering, Monash University, Final Report, 107 p.

Moraga A, Chong G, Fortt MA, Henríquez H (1974) Estudio geológico del Salar de Atacama. Provincia de Antofagasta. *Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas*, 29, Santiago, Chile, 56 p.

Munk LA, Hynek SA, Bradley D, Boutt D, Labay K, Jochens H (2016) Lithium brines: A Global Perspective. *Reviews in Economic Geology*, 18, 339-365.

Peralta Arnold YJ, Cabssi J, Tassi F, Caffè JP, Vaselli O (2017). Fluid geochemistry of a deep-seated geothermal resource in the Puna plateau (Jujuy Province, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.03.030.

Rettig SL, Jones BF, Risacher F (1980) Geochemical evolution of brines in the Salar de Uyuni, Bolivia. *Chemical Geology*, 30, 57-79.

Risacher F, Fritz B (1991) Quaternary geochemical evolution of the Salar of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chemical Geology*, 90, 211-231.

Schmidt N (2010) Hydrological and hydrochemical investigations at the Salar de Uyuni (Bolivia) with regard to the extraction of lithium. *FOG*, 26.