

M Ó D U L O

LITIO

¿SALIDA A LA CRISIS ECONÓMICA EN BOLIVIA?



HE
Alf
S
Kla
G
ml

RN KB KI
D
V
W
E
K
B
H
E
H
K
E
R

e

PROYECTO
EDITORIAL



Desde 2017 editamos libros especializados en temas sociales de Bolivia, América Latina y el mundo, aportando una comprensión crítica que genere alternativas.

Últimos títulos publicados:

Derechos indígenas y ambientales ante el extractivismo en Bolivia

Oscar Campanini, Pablo Villegas N. (2019)

Calibán y la bruja. Mujeres, cuerpo y acumulación originaria

Silvia Federici (Primera edición boliviana 2019)

Derechos y violencias en los extractivismos. Extrahecciones en Bolivia y Latinoamérica

O. Campanini, M. Gandarillas, E. Gudynas (2019)

Pueblos amazónicos en aislamiento voluntario bajo la amenaza de muerte por actividades extractivas

Georgina Jiménez (2020)

El negocio de mercurio en Bolivia. Estudio sobre la comercialización para la minería aurífera en Bolivia

Oscar Campanini G. (2020)

Frontera hidrocarburífera. Expansión y violaciones de los derechos en Sudamérica (edición digital)

Milson Betancourt - Oilwatch (2021)

Los movimientos sociales en América Latina. Cartografiando el mosaico (edición digital)

Ronaldo Munk (2021)

Tras El Dorado. Crónica de la explotación del oro en la Amazonía

Jimena Mercado (2021)

El efecto dominó. Guerra en Ucrania y extractivismos en América Latina (edición digital)

J. Bordera, D. Gatti, E. Gudynas, P. Villegas (2022)

lalibrelibreriasocial.com

LITIO

¿salida a la crisis económica en Bolivia?

MÓDULO LITIO

Memoria del curso *Crisis, energía e impactos ambientales. Fracking y litio: ¿salidas a la crisis económica en Bolivia?*

Marco Condoretty Vargas
Sergio Gaviria Melo
Gonzalo Mondaca G.
Pablo Villegas Nava
Gonzalo Gutiérrez

LITIO

¿salida a la crisis económica en Bolivia?

MÓDULO LITIO

Memoria del curso *Crisis, energía e impactos ambientales. Fracking y litio: ¿salidas a la crisis económica en Bolivia?*

Litio, ¿salida a la crisis económica en Bolivia?

Esta publicación corresponde al módulo litio del curso *Crisis, energía e impactos ambientales. Fracking y litio: ¿salidas a la crisis económica en Bolivia?*

Autores de este módulo:

Marco Condoretty Vargas
Sergio Gaviria Melo
Gonzalo Mondaca
Pablo Villegas Nava
Gonzalo Gutiérrez

Compilador:

Oscar Campanini

Editorial:

LALIBRE Proyecto Editorial
Humboldt 1135, casi esq. Calancha
Tel. 591(4) 450 4199
Contacto: lalibre.libreriasocial@gmail.com
Cochabamba, Bolivia

Corrección de estilo:

Patricia Quiñones G.

Portada y edición gráfica:

Efraín Ramos

Copyright © 2022

Mayo de 2022

ISBN: 978-9917-9966-1-3

Depósito Legal No. 2-1-2351-2022

La presente edición es posible gracias al apoyo de:

Brot
für die Welt

50 jaar **milieudefensie**

El contenido de la publicación es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de las mencionadas entidades.

Contenido

Presentación	5
Síntesis del litio y el horizonte temporal de la fabricación de baterías en Bolivia: el litio desde el yacimiento hasta la batería <i>Marco Condoretty Vargas</i>	7
Geoquímica y riesgos ambientales de la explotación de salares <i>Sergio Gaviria Melo</i>	21
Situación de los recursos hídricos en la zona del salar de Uyuni y su relación con el proyecto de industrialización del litio en Bolivia <i>Gonzalo Mondaca G.</i>	37
Bolivia: de la industrialización del litio a la del titrio <i>Pablo Villegas N.</i>	71
Litio en Chile: actualidad y perspectivas <i>Gonzalo Gutiérrez</i>	79
<i>Sobre los autores</i>	95

Presentación

La economía mundial está pasando por una nueva fase de búsqueda, acopio, transporte y transformación de materias primas, pero ahora gran parte de este esfuerzo se orienta a un nuevo conjunto de minerales que se denominan estratégicos. El litio es uno de ellos, por ende, existe una gran cantidad de empresas e intereses que pusieron su mirada en los yacimientos del mundo. Este es un elemento importante para la industria automovilística y electrónica en general por sus propiedades físicas y químicas. Varios organismos e instituciones coinciden en el incremento de su demanda para los próximos años, más aún cuando se vincula, casi directamente, a este mineral con la posible transición energética, justamente por su cualidad en el almacenamiento de energía.

En este contexto, Bolivia entra al escenario, ya que cuenta con el salar más extenso en cuanto a superficie a nivel mundial y con la mayor cantidad de recursos de litio de salmuera en el ámbito regional. Se trató de implementar una estrategia para la extracción y aprovechamiento del litio, cuyos resultados llevan más de 10 años sin rendir frutos. A pesar de estas contravenciones, la presión y tensión sobre los ecosistemas del salar siguen latentes y vigentes, más aún en un momento de intersección de múltiples crisis, ligadas a aspectos económicos, energéticos y climáticos.

El Centro de Documentación en Información de Bolivia (CEDIB) se propuso coadyuvar en el debate público sobre esta realidad y los impactos de los extractivismos en el país. La urgencia de una sociedad civil que cuente con información de calidad es una forma de ejercer los más básicos derechos, además de que la complejidad del escenario nacional necesita de una participación cualificada y pertinente ante el proceder de los intereses externos e internos.

El curso *Crisis, energía e impactos ambientales. Fracking y litio: ¿salidas a la crisis económica en Bolivia?*, se propuso abordar el tema energético a partir de estos escenarios de múltiples crisis, pero con la idea de incursionar y fortalecer, especialmente, la mirada a través de lo técnico y científico. Este enfoque tiene el fin de generar una mayor fortaleza y claridad para entender la problemática del litio desde los conceptos físico-químicos generales y su posterior utilización en las baterías, hasta las implicancias geopolíticas y regionales.

Esta forma de tratar la problemática se constituyó en un gran esfuerzo del CEDIB, pero también se contó con la colaboración de destacados profesionales, de primer nivel, del continente y una gran cantidad de personas que participaron en el curso. Esperamos que toda esta información ayude a consolidar un urgente debate sobre los recursos naturales y el ejercicio de los derechos.

CEDIB

Síntesis del litio y el horizonte temporal de la fabricación de baterías en Bolivia: **el litio desde el yacimiento hasta la batería**

Marco Antonio Condoretty Vargas

Introducción

El presente artículo expone las principales consideraciones técnicas y características que implica la fabricación de las baterías de litio, mediante la presentación de aspectos generales y específicos que hacen al desarrollo tecnológico, desde la extracción hasta la transformación del litio. Gran parte de lo descrito se constituye en las bases técnicas consideradas en los procesos técnicos.

Características generales

Es preciso conocer las diferentes fuentes de litio que existen y que este no está libre en la naturaleza, sino se encuentra en muchas rocas y sustancias, pero, por lo general, a baja concentración, por ejemplo, “en el agua de mar a 0,17 ppm, en arcillas marinas a 57 ppm, en lutitas a 66 ppm, en calizas a 5 ppm” (Vine, 1980, p. 8). Sin embargo, las más importantes son las siguientes:

- De las estructuras cristalinas de minerales hay 145 especies, la mayoría con 0,002% y -2% de óxido de litio (Li_2O):
 - Aluminosilicatos/fosfatos
 - Arcillas
- Ion litio en agua:
 - Salmueras continentales
 - Salmueras asociadas a hidrocarburos
 - Aguas geotermales
 - Agua de mar

Según World Lithium Resoucers (United States Geology Survey, 2019), hay fuentes de litio mineral en Australia y en salmueras continentales en el triángulo del litio en Sudamérica. En cuanto a los tipos de salares se identifican dos: los maduros e inmaduros (Houston, 2006). De los maduros su principal característica es tener capas de halita muy compactas, cuya estructura presenta una cantidad mayor de polígonos, pináculos maduros dentro del salar y una mayor continuidad en la resolución de la costra. Ejemplos: salar de Atacama y Hombre Muerto Oeste.

En cambio, lo que caracteriza a los salares inmaduros son las capas de costras salinas menos compactas y presentan una mayor dinámica de corrientes internas. Al mismo tiempo, tienen menores zonas con polígonos, menor cantidad de pináculos de sal dentro del salar y una resolución de la costra salina muy discontinua. Ejemplos: salar de Uyuni, Cauchari, Olaroz, Salinas Grandes, Arizado, Pocitos y Hombre Muerto Este. También existen salares mixtos, como Maricunga.

Debido a las características anteriormente mencionadas, se afirma que cada salar tiene diferentes tipos de salmueras —zonas de cloruro y de sulfatos—. Por tanto, la explotación de la salmuera en un salar maduro e inmaduro es muy particular. En el maduro, al tener capas de costra muy compactas, los perfiles de succión horizontales son más extensos, lo que genera interferencia de succión en pozos cercanos. Si el salar es muy pequeño, se afecta al ecosistema de sus orillas.

Por el contrario, en un salar inmaduro, que tiene costras no muy compactas y corrientes internas dinámicas, el perfil de succión es más vertical, por lo que hay menos interferencia entre pozos de succión, y en el caso de un salar no muy extenso no se afecta al ecosistema de sus orillas. Otro parámetro a tomar en cuenta en la explotación del litio es la relación con otros elementos que se encuentran en los salares. Estos pueden llevar a enfrentar dificultades o a considerar pasos adicionales en su procesamiento, como el magnesio y el sulfato.

Por ejemplo, en los principales salares del llamado triángulo del litio la relación magnesio/litio en Hombre Muerto, en Argentina, es muy baja; en el de Atacama, en Chile, media, y en el salar de Uyuni, en Bolivia, muy alta. La relación sulfato/litio en el de Atacama es muy baja; en Hombre Muerto, media, y en el salar de Uyuni, muy alta. Solo para efectos de comparación, en los salares de China que actualmente cuentan con factorías de litio, la relación magnesio/litio es cuatro veces más alta que en Uyuni. Aparte de las relaciones mencionadas, es necesario apuntar que un salar presenta varios elementos químicos en solución, debido a las características de su origen o formación, pudiendo depender de su cercanía con otros yacimientos minerales, ubicados a orillas de los salares, o también por arrastre de las cuencas existentes. Es importante conocer estos elementos, ya que para industrializar el litio estos pueden favorecer o volver complejos los procesos de industrialización.

Importancia en el desarrollo tecnológico

¿Por qué el litio es tan importante en la industria de las baterías secundarias de ion litio? Primero, porque es el metal más liviano que existe y porque su capacidad energética teórica, 3.860 Ah/kg, es la más alta en comparación con otros elementos utilizados para fabricar baterías. Por ejemplo: si se desea generar un amperio durante una hora y si se utiliza plomo se requiere 3,85 g, si se usa cadmio se precisa 2,13 g, pero si se emplea litio solo es necesario 0,23 g.

Por estas razones, el litio es un elemento fundamental en una batería secundaria. La sal más utilizada para las baterías de litio es el carbonato de litio (Li_2CO_3), pero no es la única, también se puede usar hidróxido de litio, oxalato de litio y otros. El carbonato de litio no solo se emplea para fabricar

material catódico y ensamblar una batería, también sirve, según su grado de pureza, para medicinas, vidrios y cerámicas. De acuerdo con su pureza, las sales se aplican de diferente manera.

Por esta razón, es importante conocer el yacimiento que se quiere explotar y qué producto se obtendrá, ya que con esta información el camino de la industrialización del litio será mucho más eficaz y eficiente. De los actuales productores de carbonato de litio a través de minerales o de salmueras continentales, ya sea de planta en actual producción o de proyectos piloto en camino a su desarrollo industrial, resaltan los siguientes:

- La Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) produce carbonato de litio desde 1997 y tiene una capacidad instalada de 40.000 t/año. Sus operaciones incluyen la extracción de salmueras de pozos dentro del salar, pozas de evaporación solar —dentro del salar— y planta química —dentro del salar—.
- Albemarle produce carbonato de litio grado técnico desde 1984 y grado batería desde 2017. Su capacidad instalada es de 44.000 t/año, sus operaciones abarcan la extracción de salmueras de pozos —dentro del salar—, pozas de evaporación solar —dentro del salar— y planta química —Antofagasta a 270 km del salar— (Albemarle, s.f.).
- Nemaska Lithium tiene una capacidad instalada de 37.000 t/año de hidróxido de litio —a partir del mineral de litio de 1,45% Li_2O —, su recurso es 38,2 millones TM de óxido de litio y el tiempo de vida del proyecto es 26 años. Sus operaciones contemplan la extracción del mineral, planta metalúrgica para extraer litio en forma de sulfato de litio (Li_2SO_4) y planta química para obtener carbonato de litio (Nebraskalithium, s.f.).
- La Empresa Estratégica Yacimientos de Litio Bolivianos tiene construida y operativa una planta piloto para producir 1.500 t/año de carbonato de litio grado técnico. Actualmente, se encuentra en construcción una planta industrial con capacidad para 15.000 t/año de carbonato de litio grado batería. Desde 2019 se tiene la constancia de que el salar de Uyuni ostenta 22 MTM de carbonato de litio equivalente (LCE). Sus operaciones incluyen la extracción de salmueras de pozas —dentro del salar—,

Tabla 1 Porcentajes de pureza en diferentes calidades de carbonato de litio, según estándar de China.

Fuente: Con base en los datos estándares de China de 2013

Calidad del carbonato de litio	Li ₂ CO ₃ > 99,5%	Li ₂ CO ₃ = 99,2%	Li ₂ CO ₃ = 99%	Li ₂ CO ₃ = 98,5%
Estándar de la República Popular China	YS/T 582-2013	GB/T 23853-2009		
Compuesto/ características	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Sodio (Na)	0,025	>0,1	>0,15	>0,2
Magnesio (Mg)	0,008	<0,015	<0,035	<0,05
Calcio (Ca)	0,005	<0,025	<0,035	<0,07
Potasio (K)	0,001	<0,003	<0,004	<0,008
Hierro (Fe)	0,001	<0,0015	<0,0035	<0,007
Boro (B)		<0,006	<0,012	<0,018
Zinc (Zn)	0,0003			
Cobre (Cu)	0,0003			
Plomo (Pb)	0,0003			
Silicio (Si)	0,003			
Al	0,001			
Mn	0,0003			
Ni	0,001			
Sulfato (SO ₄)	0,08	<0,2	<0,35	<0,5
Cloro (Cl)	0,003	<0,05	<0,08	<0,1
Insoluble		<0,015	<0,015	<0,005
Impurezas magnéticas	<0,0003			
Humedad	<0,25	<0,5	<0,6	<0,8
Tamaño de partícula	d10 ≥ 1µm 3µm ≤ d50 ≤ 8µm 9µm ≤ d90 ≤ 15µm			

pozas de evaporación solar —dentro del salar— y planta química —dentro del salar— (YLB, 2020).

- Sales de Jujuy S. A., su capacidad es de 15.000 t/año grado batería desde 2015, el costo de producción es USD 4.302/t, su recurso es 6,4 MTM LCE Li=473 mg/L y la vida del proyecto es 40 años. Sus operaciones incluyen la extracción de salmueras de pozas —dentro del salar—, pozas de evaporación solar —fuera del salar— y una planta química —fuera del salar— (Sales de Jujuy, s.f.).

- Pepinini Lithium Limited, el costo de producción es 4.500 dólares por TM, la capacidad instalada de la planta industrial es de 15.000 t/año Li=313 mg/L y su recurso es 239.000 TM de litio (63% evaluado). Sus operaciones abarcan la extracción de salmueras de pozos en dos salares diferentes, Incahuasi y Rincón (dentro del salar), pozas de evaporación solar —no se menciona— y una planta química —fuera del salar— (Pepinini Lithium, s.f.).
- Millennial Lithium, actualmente la planta piloto es de 3 TPM, el costo de producción es USD 3.388/TM, la capacidad instalada de la planta industrial es de 24.000 t/año Li=439 mg/L, su recurso es de 943.000 TM LCE (23%) y la vida del proyecto es 40 años. Sus operaciones son la extracción de salmueras de pozas —dentro del salar—, pozas de evaporación solar —fuera del salar— y una planta química —fuera del salar— (Millennial Lithium, s.f.).
- Rincon Lithium, actualmente su planta piloto está en operación, la capacidad instalada de la planta industrial es de 25.000 t/año Li=400 mg/L, su recurso es 4,3 MTM LCE y la vida del proyecto es 30 años (Rincon Ltd., 2020).
- Falchani Lithium Project, la capacidad instalada de la planta industrial es de 23.000 t/año de mineral de litio de 3.300 ppm, el costo de producción es USD 3.958/TM, su recurso es 4,7 MTM LCE —al 90%— y la vida del proyecto es 33 años. Sus operaciones constan de la extracción del mineral, una planta metalúrgica para extraer el litio en forma de sulfato de litio y la planta química para obtener carbonato de litio (Plateau Energy Metals, 2020).

Por lo expuesto, se evidencia que existen muchas iniciativas, pero cada una se constituye en un caso particular en la industria del litio. Por esto, es muy importante conocer el yacimiento, saber a dónde se quiere llegar con el producto y priorizar los resultados/perspectivas a partir del desarrollo de una planta piloto para acceder a datos técnicos y económicos. Estos aspectos determinan la viabilidad de un proyecto técnico y económicamente rentable.

A continuación, se resumen los pasos a seguir en la industria del litio desde un yacimiento de salmueras continentales, hasta uno de carbonato de litio grado batería:

- Evaluación geológica: para conocer qué tipo de salar es, se tienen que evaluar los recursos y reserva, caracterizar químicamente la salmuera, realizar pruebas de bombeo, geoquímica e hidrogeología con el fin de determinar las redes de bombeo para la extracción racional de las salmueras.
- Definir cómo se concentrará el litio: la opción de piscinas de evaporación, extracción por solventes, membranas u otras alternativas.
- Una vez obtenido el litio concentrado, ya sea en una solución o en algún tipo de sal, la siguiente fase del proceso de purificación de carbonato de litio grado batería, de manera general, comprende las etapas de remoción de impurezas, carbonatación, purificación, secado, molienda y embalaje.

La complejidad del proceso global está en función al tipo y cantidad de impurezas presentes en la materia prima. Por esta razón, es importante elaborar un estudio técnico y económico del proceso a ser utilizado, ya que este permitirá determinar los márgenes de utilidad que se pueden generar en la producción de carbonato de litio grado batería.

En el desarrollo de un proceso productivo es fundamental tomar en cuenta los pasos de laboratorio, pilotaje y planta industrial, en especial cuando el yacimiento es complejo. También es válido emplear equipos multidisciplinarios con grado de experticia.

Baterías de litio

Para fabricar hasta una batería secundaria de ion litio, el carbonato de litio grado batería simplemente es un precursor que se emplea para la síntesis de material catódico. Por tanto, para producir una batería aún faltaría una planta de ensamblaje de celdas básicas, ya que en esta se ensamblaría según la necesidad energética de las baterías de ion litio.

En cuanto a la utilización de las baterías secundarias de ion litio, es necesario presentar la siguiente reseña:

Los autos eléctricos existen desde 1898. El primero fue construido por F. Porsche —batería plomo-ácido— en 1914. Un vehículo eléctrico costaba USD 1.750, mientras uno a gasolina, USD 600 (Daily Mail, 2013). Varios fac-

tores influyeron para que el automóvil a gasolina desplace al eléctrico. Pero, aun con dificultades y desventajas, se siguieron construyendo autos eléctricos: en 1990 salió el GM Impact y en 1996, el GM EV1 (General Motors EV1, 2021).

El uso del automóvil a gasolina empezó a reportar un crecimiento logarítmico, por ende, los indicadores de polución, a partir de 1960, se incrementaron bruscamente en las principales ciudades del mundo, donde su utilización era excesiva (CARB, 2020). Esta problemática aceleró el desarrollo de la batería de ion litio, la cual empezó a tomar mucha importancia, ya que una de plomo ácido contiene material tóxico, es pesada y grande, siendo estas sus principales desventajas (GAES, 2017). A continuación, se resume el avance tecnológico de las baterías y celdas.

En el campo de los acumuladores de energía están las siguientes:

- Baterías primarias: no son recargables (Wikipedia, 2020).
- Baterías secundarias: son recargables (Wikipedia, 2021).
- Celdas de combustión: generan energía eléctrica (Wikipedia, 2021).

En cuanto a la química de las baterías secundarias, el desarrollo tecnológico se presenta en la Tabla 3.

La batería secundaria de ion litio, al poseer mejores parámetros en comparación con sus predecesores, en poco tiempo avanzó tecnológicamente a pasos muy grandes. Tiene tres componentes principales: cátodo, ánodo y electrolito. Sin embargo, estos no son los únicos, ya que está compuesta por muchos otros elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos. Estas baterías se manejan con un principio muy sencillo:

- En el proceso de carga —cuando el dispositivo electrónico se alimenta con energía eléctrica— existe la intercalación del ion litio del cátodo al ánodo. El papel de la alimentación eléctrica es proporcionar electrones para que el ion litio se deposite en el ánodo.
- En el proceso de descarga —cuando el dispositivo electrónico funciona y utiliza la energía de la batería— existe la intercalación del ion litio del ánodo al cátodo, es decir, se liberan electrones —generación de electricidad— y el ion litio se deposita en el cátodo.

Tabla 2 Comparación entre un auto eléctrico y uno a gasolina.

Fuente: Con base en diversos autores

AUTO ELÉCTRICO	AUTO A GASOLINA
Precio elevado	Más barato
Batería muy grande y pesada (plomo-ácido)	Batería pequeña
Calefacción limitada por el uso de energía	Más horas de calefacción (aprovecha la combustión)

Tabla 3 Diferentes características del desarrollo tecnológico de las baterías secundarias.

Fuente: Con base en diversas fuentes

BATERÍA DE PLOMO ÁCIDO	BATERÍA DE NÍQUEL (Ni Cd)	BATERÍA DE LITIO	SONY (LCO)
<ul style="list-style-type: none"> Desarrollada en 1859. Energía específica: 45 Wh/kg Ciclos: 200 ciclos Sobrecarga: 2,4 V Eficiencia: 50 a 95% Descarga: 1% por día 	<ul style="list-style-type: none"> La batería de níquel fue combinada en: Ni Cd (1899) Ni Fe (1901) Ni MH (1967) Energía específica: 80 Wh/kg Voltaje: 1,2 V Descarga: LSD NiMH: 3% por día Toxicidad Cd: Alta Efecto memoria: Sí 	<ul style="list-style-type: none"> Descubierta en 1980 por K. Mizushima, P. C. Jones, P. J. Wiseman y J. B. Goodenough Primera batería de litio: 1985, ensamblada por Akira Yoshino Venta de baterías de litio: 1991 	<ul style="list-style-type: none"> Voltaje: 3,6 V Capacidad específica: 200 Wh/kg Efecto memoria: No

Evidentemente, estos son procesos de reacciones reversibles, pero cada vez que se carga y descarga se reporta una degradación y reacciones irreversibles en los componentes. Al tiempo en el cual la batería se degrada y baja su rendimiento se lo denomina ciclaje —número de cargas/descargas de una batería—. Cuando una batería cumplió su ciclaje de diseño ya no es capaz de almacenar energía eléctrica.

Además, las baterías secundarias de ion litio están conformadas por tres familias químicas que son las más conocidas e importantes:

- LCO (óxido de litio cobalto): es la primera química que se desarrolló en el campo de las baterías de ion litio. En el compuesto químico en el cátodo LiCoO_2 , tipo Layered 2D, el voltaje nominal es 3,6 V y la energía específica 150-190 Wh/kg.
- LMO (óxido de manganeso litio): es una química existente en las baterías de ion litio. En el compuesto químico en el cátodo Li_2MO_3 , tipo Spinel 3D, el voltaje nominal es 3,8 V y la energía específica 100-135 Wh/kg.
- LFP (fosfato de hierro litio): es una química existente dentro de las baterías de ion litio. En el compuesto químico en el cátodo LiFePO_4 , tipo Olivine 1D, el voltaje nominal es 3,3 V y la energía específica 90-120 Wh/kg.

Cada una de estas químicas tiene sus propias características que conllevan ventajas y desventajas en el campo de su aplicación (RCE, 2012), y están enfocadas principalmente en su voltaje —energía que puede suministrar—, su capacidad energética —horas de uso—, ciclaje —años de vida de la batería— y otros.

Para pasar de un yacimiento de salmuera a una batería de ion litio se requieren las siguientes etapas: extracción y concentración del litio del yacimiento —redes de bombeo y piscinas de evaporación solar—, conversión química del litio como materia prima en carbonato de litio grado batería —planta química—, síntesis de un material catódico de litio a partir del carbonato de litio y otros minerales —planta química—, preparación de material catódico y ensamblaje de celdas básicas de litio —planta de preparación y ensamblaje— y ensamblaje de celdas básicas de litio para conformar una batería de ion litio para vehículos —planta de ensamblaje—.

Por tanto, para producir una batería de ion litio se necesitan plantas de ensamblaje y química. Por ejemplo, si se quiere producir óxido de manganeso litio el proceso para la síntesis de este son las reacciones en estado sólido —similar a un proceso productivo del cemento—. En este caso lo que se

hace es una mezcla mecánica de las materias primas —precursores—; luego la molienda, en la que la etapa principal es la precalcación, y, por último, la molienda en sí y el tratamiento térmico por calcinación. El material catódico, una vez obtenido, debe ser caracterizado y evaluado electroquímicamente para que sea apto para la preparación y ensamblaje de una pila de litio.

La planta de preparación de material catódico y de ensamblaje de baterías comprende las siguientes etapas: el material catódico sólido es preparado para su aplicación mediante la adición de agentes químicos orgánicos —aglomerantes y conductores—; se alista de la misma manera el ánodo, además del electrolito y los demás componentes de una celda para su ensamblaje, y una vez ensamblada la celda se la inspecciona y se hace su caracterización electroquímica. La celda está compuesta de una básica de ion litio. Una batería es un conjunto de celdas básicas, que bajo una configuración de diseño permite obtener una batería con voltaje, capacidad y potencia que se requirieren para un determinado objeto.

La planta de ensamblaje consiste en un pack de celdas básicas, que se hace siguiendo el diseño de una configuración adecuada para el fin que se busca. Después de este trabajo se ensambla en BMS (Battery Management System), que es el componente electrónico más importante de una batería y tiene que estar diseñado según la química de las celdas básicas de ion litio (Energy EV, 2014). Siguiendo los pasos mencionados una batería de ion litio ya estaría lista para ser utilizada en un auto eléctrico.

Conclusiones

Fabricar una batería de ion litio para autos eléctricos implica muchas plantas; la tecnología necesaria es diversa y comprende diferentes áreas del conocimiento. Las tecnologías para las baterías están en constante desarrollo, por lo que es preciso estar al tanto de los avances de la tecnología y ciencia del litio, esto con el fin de conseguir el costo de kilovatio hora más competitivo (CARB, 2016).

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Albemarle. (s.f.). Sostenibilidad-Comunidades. <http://www.albemarlelitio.cl/careers/comunidades>
- California Air Resources Board. (2016). Advanced clean transit battery cost for heavy-duty electric vehicles. https://ww3.arb.ca.gov/msprog/bus/battery_cost.pdf
- California Air Resources Board. (2020). *History*. <https://ww2.arb.ca.gov/es/about/history>
- Energy EV. (2014). Las baterías de litio y BMS, ¿cómo funcionan? <https://energyev.com/las-baterias-de-litio-y-bms-como-funcionan/>
- Energy Industry Review. (2021). American Lithium Acquired Plateau Energy Metals. <https://energyindustryreview.com/marketplace/american-lithium-acquired-plateau-energy-metals/>
- Houston, J. (2006). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. *Journal of Hydrology*, v. 330, pp. 402-412. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.036>
- Karl, N. A., Mauk, J. L., Reyes, T. A., & Scott, P. C. (2019). *Lithium Deposits in the United States: U.S. Geological Survey data release*. <https://doi.org/10.5066/P9ZKRWQF>
- KPMG International Cooperative. (2017). Global automotive executive survey. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2017/01/global-automotive-executive-survey-2017.pdf>
- Abandoned for gas guzzlers, the astonishing 103 year old electric car that was ahead of its time (2013, enero 16). *Mail Online*. <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2262827/Detroit-Electric-Model-D-Abandoned-gas-guzzlers-amazing-103-year-old-electric-car.html>
- Nemaska Lithium. (2017). Whabouchi Project. https://www.nemaskalithium.com/assets/documents/environment/NMX_ACEE_Whabouchi_rapport%20annuel%202017_public-web.pdf

- Pelegov, D. (2018). Batteries, Fuel Cells, and Their Role in Modern Society. <https://www.edx.org/course/batteries-fuel-cells-role-modern-society-urfux-batfuelc>
- Recarga Coches Eléctricos. (2012). Todo sobre las baterías de litio. <https://www.recargacocheselectricos.com/todo-sobre-las-baterias-de-litio/>
- Vine, J. D. (1980). *Where on Earth is all the lithium*. Geol. Surv. U.S. Dept. Interior, USGS OFR 80-1234, p. 114.
- Wikipedia. (2021). Pila de combustible. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pila_de_combustible&oldid=139434075
- Wikipedia. (2021). General Motors EV1. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=General_Motors_EV1&oldid=1057700126
- Wikipedia. (2020). Celda Primaria. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Celda_primaria&oldid=131619998
- Wikipedia. (2021). Batería recargable. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Bater%C3%ADa_recargable&oldid=136322850

Geoquímica y riesgos ambientales de la explotación de salares

Sergio Gaviria

Introducción

Los salares del llamado triángulo del litio localizados en la cordillera Andina, entre el sur de Bolivia y el norte de Chile y Argentina, son objeto de estudios geológicos enfocados en la evaluación geoquímica de los elementos químicos. En el proceso natural de evaporación del agua en cuencas cerradas o endorreicas con clima seco, que dura miles de años, se concentran y cristalizan las sales solubles. Los salares de Uyuni en Bolivia, Atacama en Chile o Salinas Grandes y Hombre Muerto en Argentina son los más conocidos y aprovechados para extraer diferentes elementos químicos.

La región andina contiene las mayores reservas mundiales de litio del orden del 80%, ya que posee salmueras con concentraciones que superan las 500 ppm. El litio es poco abundante en la corteza terrestre, el valor *background* promedio en rocas se estima en 65 ppm. Su explotación implica la concentración de grandes volúmenes de salmuera, que es extraída por medio de

pozos perforados a diferentes profundidades en los salares, bombeada a la superficie y vertida en piscinas de evaporación sobre la misma costra salina para llevarla al 10% de su volumen inicial. Se calcula que, por cada tonelada de sal de litio, se evaporan dos millones de litros de agua, es decir, una relación de 1/2.000. Por tal razón, la minería del litio de salmuera es principalmente una minería de agua (Aranda, 2018). También se extrae cloruro de sodio y sales de potasio, magnesio, boro y sulfatos.

Las sales cloruradas (halita [NaCl], silvita [KCl], bischofita [MgCl₂], carnalita [KMgCl₃], entre otras), las sales sulfatadas (yeso y anhidrita [CaSO₄], mirabilita o sal de Glauber [Na₂SO₄], hexahidrita, kieserita y epsomita [MgSO₄]) y las sales carbonatadas (calcita [CaCO₃] y natrón [NaHCO₃]) son los productos minerales más representativos asociados a los procesos de precipitación y de cristalización fraccionada en estos ambientes evaporíticos. Sin embargo, en los últimos años la abundancia relativa de sales de litio propició la exploración geoquímica y la explotación de salmueras, así como su industrialización exponencial, para el beneficio de este elemento en aplicaciones crecientes relacionadas con el uso en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos —20% de autos en el mundo en 2020— y para dispositivos electrónicos, entre otras.

El proyecto integral de la salmuera en el salar de Uyuni del gobierno de Bolivia encontró que en el proceso de extracción y beneficio para producir carbonato de litio se concentraban otros compuestos de interés abundantes en la salmuera, para fertilizantes agrícolas y otros usos industriales: cloruros de potasio y magnesio o sulfatos de sodio. El módulo “Geoquímica y riesgos ambientales de la explotación de salares”, del curso *Crisis, energía e impactos ambientales. Fracking y litio: ¿salidas a la crisis económica en Bolivia?*, que ofrece el CEDIB, presenta experiencias adquiridas en el marco de la evaluación independiente de los estudios de impacto ambiental por la explotación de elementos en el salar de Uyuni, como caso de estudio y en referencia a otros salares de la región.

Antecedentes

Desde la década de los 70 del siglo XX, Bolivia inició estudios sobre los salares interandinos localizados en el sur del país. El salar de Uyuni con

10.000 km² es el de mayor extensión en el mundo y contiene salmueras ricas en sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), boro (B), litio (Li), calcio (Ca) con agua de tipo sodio-clorurada y contenidos menores de sulfato. Con el fin de reconocer las fuentes de estos elementos en las cuencas y la historia de los procesos de transporte y de acumulación en los salares, ORSTOM, hoy Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Francia, y United States Geological Service (USGS) hicieron investigaciones geológicas, geoquímicas y paleoclimáticas.

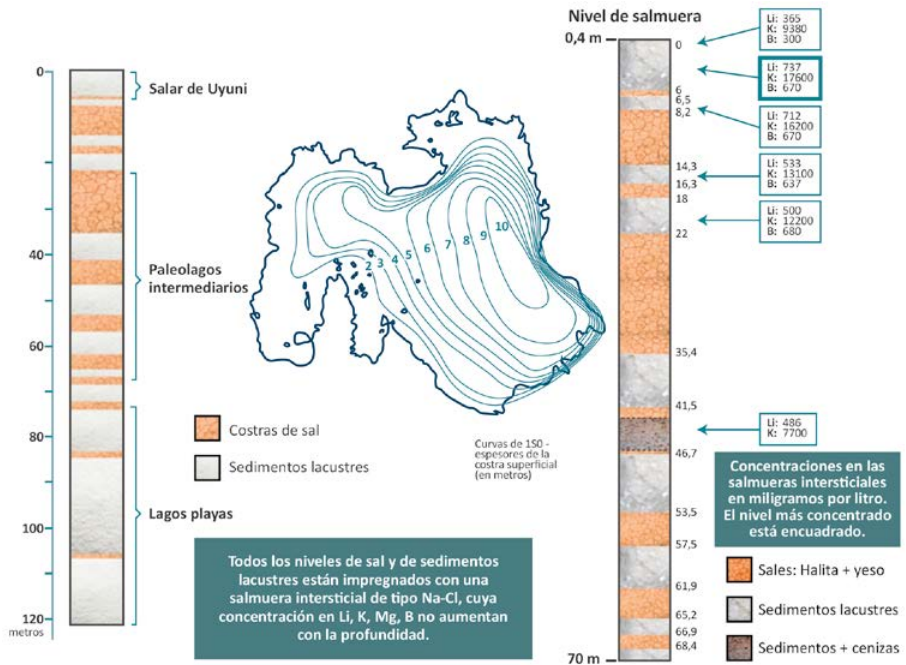
Se elaboraron informes y artículos científicos que plantean hipótesis sobre el origen de las sales y los cambios paleoambientales en los últimos 30.000 años, que son responsables de la formación de secuencias de costras salinas intercaladas con depósitos lagunares en el salar de Uyuni (Servant y Fontes, 1978; Argollo y Mourgiart, 1995; Argollo e Iriondo, 2008). Los estudios estratigráficos y el análisis geoquímico del litio, potasio, magnesio, boro y otros elementos en las costras salinas de halita, tanto en superficie como en los niveles de sal en profundidad, identificaron las zonas y los niveles de mayor concentración de los elementos de interés (Figura 1) (Richaser y Armendia, 1986; Rettig y colab., 1980; Risacher y Fritz, 1991a; Risacher y Fritz, 1991b; Risacher y Fritz, 1995; Risacher y Fritz, 2000).

Todos los niveles de sal están impregnados con una salmuera intersticial con contenidos importantes de litio, potasio, magnesio y boro, que no aumentan en profundidad. La costra salina superficial alcanza un espesor entre 4 y 10 m hacia el sur y este del salar, con una porosidad del orden de 30%. La salmuera en la zona sur frente al delta del Río Grande contiene los mayores valores promedio de litio y potasio y, según los mapas de isoconcentración de elementos (Figura 2), el boro y magnesio también son altos.

En síntesis, las investigaciones del ORSTOM y USGS —literatura citada—, así como un estudio reciente de hidráulica, revelan que la costra salina en el salar de Uyuni contiene una salmuera intersticial, cuya edad determinada con carbono-14 (¹⁴C) está entre los 12.000 a 6.000 años antes del presente (AP) (Sieland, 2014). Asimismo, los estudios paleoambientales indican que entre 13.000 y 10.000 años AP existió en el altiplano boliviano un gran lago llamado Taucá, cuyo nivel de agua alcanzó la cota de 3.720 m s. n. m. y unió

Figura 1 Estratigrafía de la zona central del salar de Uyuni, espesor de la costra de sal (m), litio y potasio en la salmuera intersticial (mg/L).

Fuente: Risacher (1986) y Risacher y Fritz (1995)



F. Risacher y B. Fritz, 1995.
Evolución cuaternaria del salar de Uyuni, altiplano central, Bolivia

F. Risacher y A. Armendia, 1986.
Primeros sondeos en el salar de Uyuni

el Uyuni con el Copiapó y Poopó como consecuencia de un periodo con clima húmedo.

En el Holoceno el lago se desecó, la evaporación dio lugar a la precipitación de sales provenientes del salar anterior, los aportes de los ríos, aportes de agua subterránea y posiblemente un aporte adicional de halita proveniente de diapiros de sal que afloran en varias partes de la cuenca. Hoy se reconocen estos últimos por la presencia de varios diapiros de yeso que forman una costra sobre la sal y se conservan en un clima cada vez más seco, como testigos remanentes después de la disolución de la halita.

Figura 2 Mapas de isoconcentración de elementos químicos en salmuera del salar de Uyuni en g/L. a. Potasio. b. Litio.

Fuente: Risacher y Fritz (1991) y Memoria GNRE (2011)

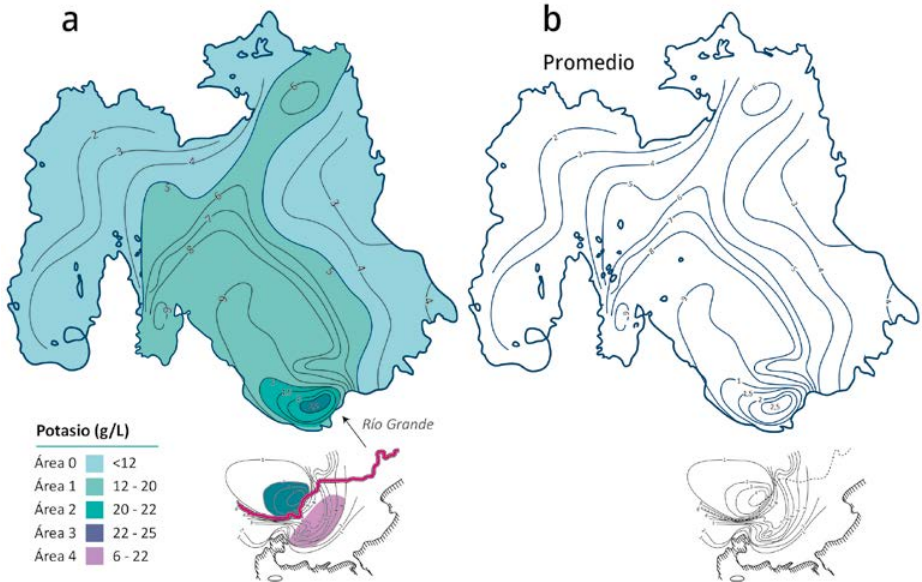
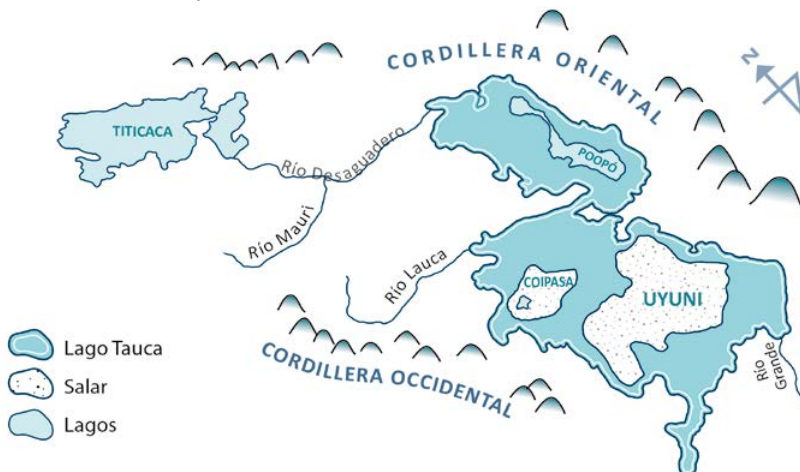


Figura 3 Lago Tauca al final de la última glaciación del Pleistoceno.

Fuente: Servant y Fontes (1978)



Geoquímica de cuencas endorreicas

Estudios geoquímicos, realizados en clima-secuencias de suelos en regiones con ambientes que pasan de húmedo a seco, muestran la evolución de los iones solubles en las aguas de escorrentía. Los productos minerales arcillosos que predominan en los suelos por meteorización en ambiente seco son las esmectitas, acompañadas de illita y contenidos menores de caolinita (Tardy, 1969).

En la Figura 4, los ambientes áridos y desérticos, como los que dominan actualmente el altiplano boliviano en la región de los salares, exponen claramente la separación de especies iónicas que se precipitan o cristalizan progresivamente en el orden de menor a mayor solubilidad en el agua a lo largo de la altiplanicie hasta llegar al lago.

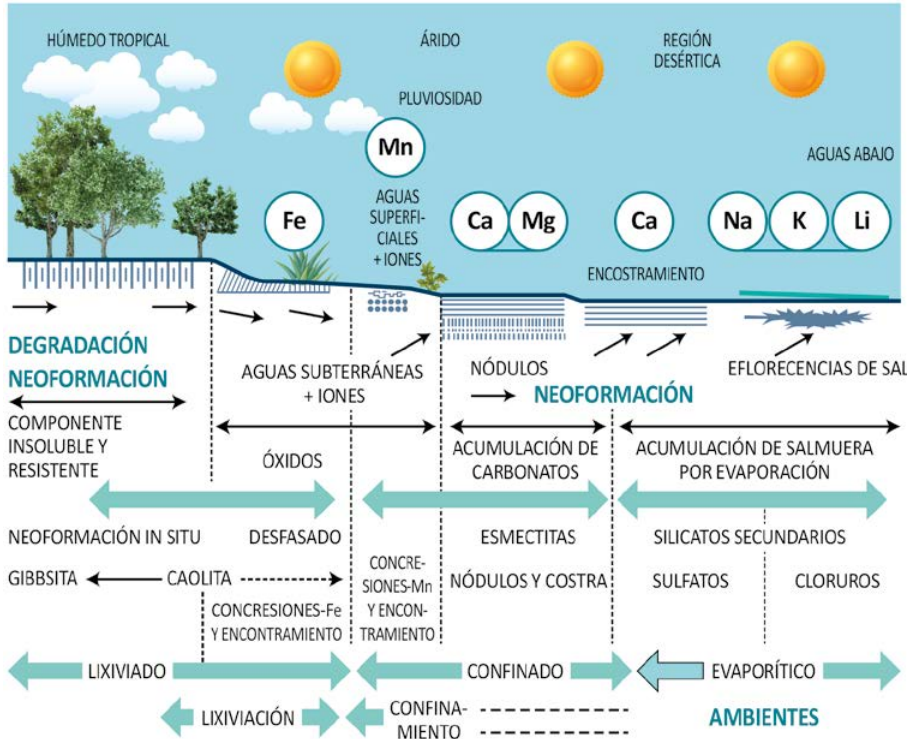
El hierro (Fe^{III}) y luego el manganeso (Mn^{IV}) son los primeros en quedar relegados en el transporte por efecto de la oxidación que producen las especies insolubles. Más adelante precipita el calcio, generalmente, en forma de nódulos y costras de carbonato insoluble (CaCO_3) junto al magnesio. Estos procesos ocurren en la cuenca de drenaje de clima árido, que en el caso de Uyuni corresponde a la parte superior del delta del Río Grande.

En la parte inferior de la cuenca donde existía el lago Tauca, hoy convertido en los salares de Uyuni y Copiapó, las especies iónicas más solubles acumulan salmueras por evaporación. Las sales menos solubles cristalizan a medida que disminuye el volumen de agua en el siguiente orden: un remanente de magnesio (Mg^{2+}) junto al litio (Li^+), posteriormente el potasio (K^+) y, por último, el sodio (Na^+).

En cuanto a los aniones, se precipitan primero en la zona del delta del Río Grande antes de ingresar al salar parte de los boratos (ulexita [NaCaBO_3]) y los carbonatos en la calcita, presumiblemente, también con magnesio y litio. Después, se cristalizan los sulfatos (SO_4^{2-}) junto al calcio en forma de yeso medianamente soluble ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). En la costra salina superficial predomina la halita y el cloruro de sodio con más de 98%. Los otros componentes son el sulfato (0,4-1%), calcio (0,1-0,2%), potasio (0,04-0,2%), magnesio (0,05-0%), boro (20-50 mg/kg), litio (10-20 mg/kg) (Risacher y Fritz, 1991b).

Figura 4 Cromatografía de iones en el paisaje, según ambientes, tipo de acumulación mineral y naturaleza de los procesos geoquímicos.

Fuente: Modificado de Tardy (1969)



En la salmuera, un remanente de sulfatos viaja en la solución junto a los cloruros y bicarbonatos (HCO_3^-). Estos últimos asocian en el agua el carbón vegetal de las turbas y otros suelos ricos en materia orgánica que se desarrollaron al borde del antiguo lago Taucá, durante la fase húmeda del final de la última glaciación y durante algunos periodos más húmedos del Holoceno, cuando extensos glaciares aportaron grandes volúmenes de agua (Servant y Fontes, 1978; Argollo y Mourguiat, 1995).

El bicarbonato es estable y soluble en el agua mientras se encuentre a pH intermedio. Esta especie permitió determinar, mediante la técnica de ^{14}C ,

la edad de la salmuera asociada a la costra salina superficial, entre 12.000 y 6.000 años (Sieland, 2014). Los últimos cationes en cristalizar formando sales por orden decreciente de solubilidad son Mg^{2+} , Li^+ , K^+ y Na^+ y están asociados a los aniones SO_4^{2-} y Cl^- . La salmuera llega a saturación con estas especies iónicas que persisten en solución, en equilibrio con las sales que se cristalizan. El predominio de la sal neutra cloruro de sodio del orden de 25% y cantidades menores de aniones alcalinos son condición para que el pH de la solución se mantenga alrededor de siete.

Lo anterior describe claramente los procesos de acumulación de elementos en una cuenca endorreica de clima desértico como el salar de Uyuni, un sistema evaporítico enriquecido en potasio, litio y otros elementos indicados anteriormente. Esto se evidencia en la composición química de la sal y de las salmueras intersticiales que saturan los espacios porosos.

La fuente geoquímica de los elementos presentes en concentraciones anómalas en el sudeste del salar parece provenir del sistema volcánico de Lipez. Allí desemboca el Río Grande (Ver Figura 2), corriente permanente que drena una gran cuenca al sur del salar de 10.000 km², desde la frontera con Chile y Argentina, mediante varios conos volcánicos mayores de 5.000 m de altura.

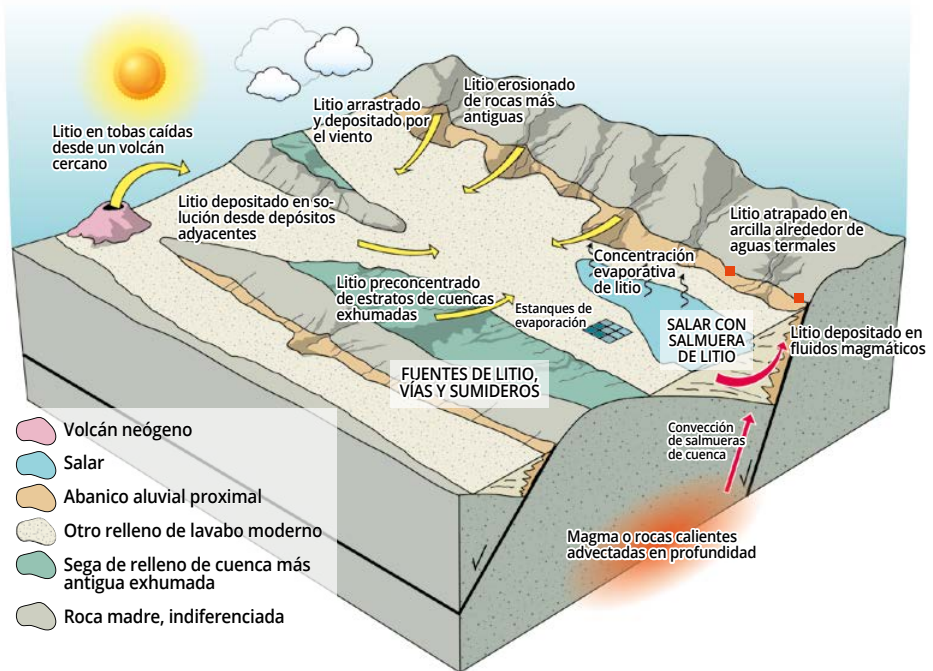
El litio es un elemento raro en la naturaleza, el valor promedio en rocas es del orden de 65 mg/kg y aumenta en ambientes volcánicos e hidrotermales. Por otro lado, forma sales solubles en el agua y puede concentrarse si las condiciones lo permiten. En la región de los salares del altiplano boliviano se reportan ambientes evaporíticos propicios, debido a la situación geológica, geomorfológica y climática que son responsables de la formación de una cuenca interna a 3.600 m de altitud en la cordillera andina, de clima desértico y sin salida al mar —cuenca endorreica—.

Un esquema general de las fuentes de litio en ambientes geológicos de cuencas endorreicas se presenta en la Figura 5.

El litio proviene de diferentes fuentes: fluidos magmáticos e hidrotermales, cenizas volcánicas, rocas antiguas que contienen este elemento y lo liberan durante la meteorización, litio atrapado por minerales arcillosos en ambien-

Figura 5 Modelo esquemático de los depósitos de salmuera de litio, que muestra la parte baja de un sistema de cuenca cerrada.

Fuente: USGS, Bradley y colab. (2013)



tes superficiales, entre otros. Por último, en cuencas cerradas de clima seco se concentra por evaporación junto a otras sales.

Aualmente, en la época de lluvias que va de diciembre a marzo, la cuenca aporta por escorrentía agua al salar que se inunda con una capa de varios decímetros. En el borde sur se presenta una ligera depresión de la costra salina, que tiene como efecto conservar esta agua fresca en contacto con la costra durante un mayor periodo de tiempo. Los procesos de redisolución y recrystalización repetidos por evaporación del agua en el ciclo anual enriquecen la salmuera en iones solubles, como potasio, magnesio, litio y boro, a lo largo de la historia hídrica de la cuenca, que da como resultado valores anormalmente muy altos de estos elementos en ese sector.

Línea base hidrogeoquímica

Un estudio elaborado por la empresa Dames and Moore reconoce en un gran número de muestras de aguas superficiales de la cuenca del Río Grande de Lípez parámetros hidroquímicos que varían según el sitio y varios órdenes de magnitud. Los factores principales son la evapoconcentración entre la cuenca montañosa y los depósitos evaporíticos, la variedad de fuentes volcánicas y termales y la presencia de mineralizaciones de sulfuros generalizada (Banks y colab., 2004).

Existe evidencia que demuestra que en las microcuencas que tienen actividad minera, e incluso en las no intervenidas, varios elementos tóxicos son liberados a las aguas y los suelos, lo que significa que ocurre un aporte geoquímico natural. Algunos de los análisis de aguas más relevantes se presentan en la Figura 6.

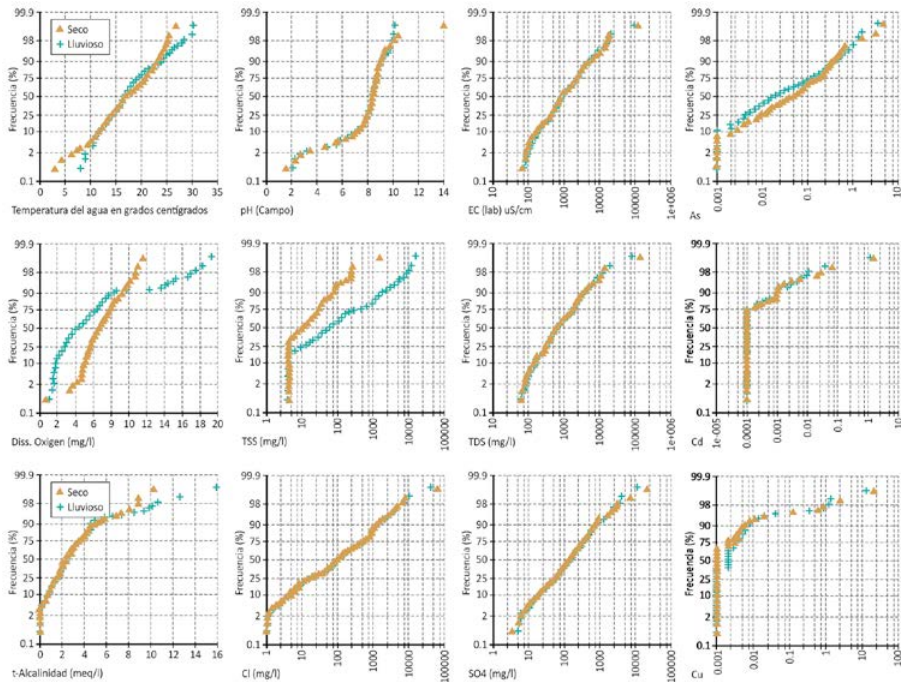
Los valores de pH son generalmente altos (mediana 8,3) con ligero incremento en la parte baja de la cuenca y algunas aguas ácidas en zonas mineralizadas. La alcalinidad sube hasta 10 meq/L para las aguas con pH más básico. La conductividad eléctrica (EC) cambia de 1.000 mS/cm y contrastes muy marcados entre 100 y 100.000 mS/cm, entre aguas frescas de escorrentía y aguas salobres o saladas enriquecidas con iones. Los valores de sólidos totales disueltos (TDS) son equivalentes, están expresados en mg/L.

Los aniones cloruro y sulfato se incrementan hasta cinco órdenes de magnitud desde las aguas de montaña y hacia la parte baja de la cuenca por efecto de la evaporación, aunque las zonas con mineralización de sulfuros también contribuyen localmente al incremento de sulfatos, debido a la exposición en zonas de actividad minera de metales o por erosión.

Las concentraciones de arsénico son altas (mediana 34 mg/L) con un máximo por encima de 1 mg/L. El altiplano boliviano se reconoce como una provincia geoquímica rica en arsénico; esta región parece provenir de las fuentes termales y mineralizaciones volcánicas. En la cuenca el arsénico es ubicuo en aguas de diferentes pH. El cadmio es un metal pesado, cuyos valores son muy bajos en la mayoría de las muestras. Sin embargo, algunas

Figura 6 Frecuencia de distribución acumulada, según los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica (EC), oxígeno disuelto (DO), sólidos suspendidos totales (TSS), sólidos disueltos totales (TDS), alcalinidad total (ALK), cloruros (Cl), sulfatos (SO₄), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), en muestras de agua superficial durante la estación seca y húmeda.

Fuente: Tomado de Banks y colab. (2004)



aguas ácidas en zonas de minería alcanzan valores entre 0,1 y 1 mg/L, que son considerados muy altos. El cobre disuelto es bajo, solo algunas muestras están por encima de 1 mg/L (Banks y colab., 2004).

Se especula que los metales pesados no son móviles en ambientes alcalinos propios del clima desértico y que, por tanto, no afectan las salmueras con aportes de agentes químicos contaminantes. Lo anterior es cierto para metales como el cobre, hierro, manganeso, plomo y zinc, entre otros. Sin embargo, existe un comportamiento particular de varios semimetales y me-

tales pesados que se pueden solubilizar en ambientes alcalinos. Así, el arsénico forma especies aniónicas de AsO_4^{3-} (arseniato, As^{5+}) y AsO_3^{3-} (arsenito, As^{3+}), solubles a pH alcalino. El antimonio (Sb) también puede formar especies hidrolizadas solubles como $\text{Sb}(\text{OH})_6^-$ a pH alcalino. Algunos metales pesados como vanadio, cromo, molibdeno y wolframio, igualmente, dan especies aniónicas solubles a pH alcalino (Wulfsberg, 2000).

Impacto hidrogeoquímico en el salar

Las plantas de potasio y litio están construidas directamente sobre la costra salina, entre 14 y 20 km del borde sur del salar de Uyuni. Las perforaciones para extraer la salmuera en una red de pozos de bombeo cortan varios niveles de sedimentos lacustres que se encuentran en condiciones reductoras al interior del salar. Se reporta la presencia de ácido sulfhídrico (H_2S), que se libera en gases de los pozos de perforación.

Esta evidencia confirma la condición anóxica de los sedimentos y el enriquecimiento en especies sulfuradas, probablemente formadas por reducción química de los sulfatos. Estas reacciones ocurrieron durante las fases húmedas glaciales del Pleistoceno, cuando se establecieron los lagos en el altiplano. Con el desecamiento de los paleolagos en cada etapa y durante el Holoceno, el ingreso de oxígeno pudo producir la reoxidación parcial de los sulfuros a sulfatos y la liberación de especies metálicas a la salmuera.

Las perforaciones pueden introducir aire dentro del salar y reactivar procesos de oxidación. Los metales traza podrían entrar en el proceso industrial de concentración de las soluciones residuales y generar otro pasivo ambiental en medio del salar. Adicionalmente, la silvita y carnalita se exportan del salar como fertilizantes agrícolas y podrían generar contaminación en suelos y plantas con elementos peligrosos.

Cantidades importantes de las sales residuales de las plantas quedan acumuladas en las piscinas dentro del salar, a la espera de la implementación de plantas adicionales para su purificación y reutilización. En las salmueras y sales residuales persisten elementos iniciales del proceso no cristalizados con posible presencia de semimetales y metales pesados.

Para terminar, los sólidos en suspensión (TSS) disminuyen por dilución en la parte montañosa de la cuenca en época de lluvia, pero aumentan de manera notable por removilización de sedimentos finos depositados en las planicies aluviales en la parte baja de la cuenca, cuando aumentan los caudales de los ríos. Simultáneamente en la parte alta disminuye el oxígeno disuelto en época de lluvias, probablemente por efecto de reacciones de oxidación de minerales sulfurados. En contraste, el oxígeno disuelto en el agua de escorrentía de la planicie aumenta por la turbulencia de las aguas y puede incentivar la formación de óxidos de hierro y el transporte de metales pesados adsorbidos en su superficie junto a las arcillas.

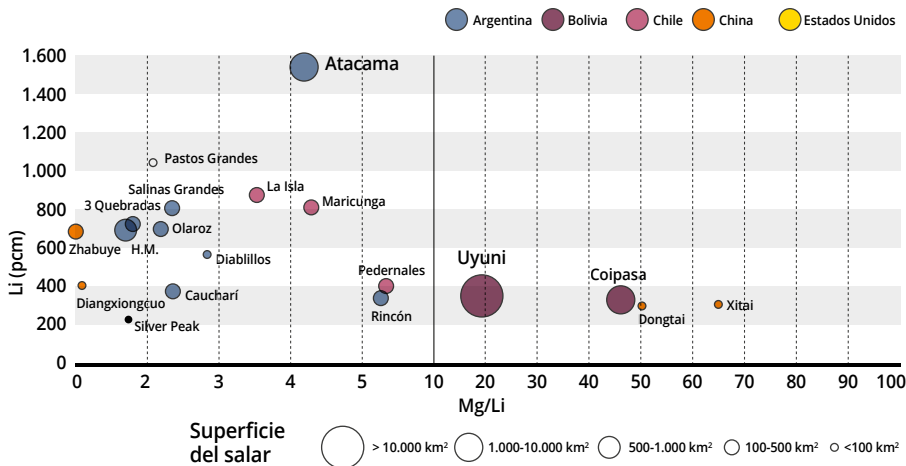
Impacto ambiental del beneficio de litio

Para extraer el litio, el proceso implica separar las otras sales que están presentes en la salmuera en grandes cantidades (NaCl , KCl , CaSO_4) por evaporación en piscinas al aire libre hasta su saturación. Para ello, se requiere disminuir radicalmente el volumen de salmuera con ayuda de la radiación solar en etapas sucesivas de cristalización fraccionada. El cloruro de litio se concentra en el licor residual para entrar a la planta de producción donde se purifica y se transforma en carbonato (Li_2CO_3), materia prima para la fabricación de las baterías de litio.

Sin embargo, la salmuera contiene también grandes cantidades de magnesio, con valores tan altos como el potasio, en una proporción $\text{Mg}:\text{Li}$ alrededor de 20:1. Este elemento no se encontró en tal porcentaje en otros salares de la puna argentina y el de Atacama de Chile, en los que la relación es menor de 10:1 (Calvo, 2017). Aunque estas sales constituyen un nuevo producto aprovechable como fertilizante y en otros usos, generan graves problemas en la purificación del litio, debido a la similitud de comportamiento químico de las sales de magnesio y litio (Crespo, Palma, Quintanilla y Quispe, 1987). Un informe reciente de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de Naciones Unidas (CEPAL) sobre gobernanza del litio en Bolivia (Obaya, 2019) señala la alta concentración de magnesio en los salares bolivianos respecto de la mayoría de los salares que se explotan en el mundo (Ver Figura 7).

Figura 7 Composición química de los salares: concentración de litio versus relación Mg:Li.

Fuente: Obaya (2019)



Cada salar tiene una química diferente y, por tanto, los métodos de extracción de litio deben adaptarse a la composición de las diferentes salmueras. En esos casos conviene la remoción inicial del magnesio por precipitación con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) antes de la etapa de concentración por evaporación bajo radiación solar. En salares de alto contenido en magnesio se prefiere la ruta por sulfatos en lugar de cloruros (Calvo, 2018). Sin embargo, la tasa de recuperación de carbonato de litio del salar de Uyuni está muy por debajo del 50%, lo que explica el interés por intentar mejorarla a partir del tratamiento de la salmuera residual (Obaya, 2019).

Por último, investigadores en energías alternativas están de acuerdo con que sería inconsistente que para obtener una energía verde a partir del litio, que requiere un desarrollo ambientalmente sostenible, se incentivara una minería no sostenible (Flexer, Baspineiro y Galli, 2018). Por ejemplo, estudios realizados en el salar de Atacama, donde se explotan las salmueras para la obtención de litio desde hace varios años, indican que un descenso del nivel de la salmuera en el salar entre 0,5 y 2 metros podría traer consecuencias irreversibles sobre la dinámica natural del sistema, con efectos ambientalmente nefastos (Marazuela, Vásquez-Suñe, Ayora, García-Gil y Palma, 2019).

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Aranda, M. C. (2018). *Una minería del agua: Análisis espacio-temporal de la región del salar de Olaroz: implicancias ambientales, estrategias de sustentabilidad y crecimiento económico local ante la minería del litio*. [Tesis de Grado en Geografía. Universidad Nacional de la Plata, Argentina], p. 74.
- Argollo, J. y Mourguiat Ph. (1995). Los climas cuaternarios de Bolivia. Argollo, J. y Mourguiat Ph. (Eds.). *Cambios cuaternarios en América del Sur*, pp. 135-155.
- Argollo, J. e Iriondo, M. H. (2008). *El Cuaternario de Bolivia y regiones vecinas*, p. 284.
- Bradley, D., Munk, L. A., Jochens, H., Hynek, S. & Labay, K. (2013). A preliminary deposit model for lithium brines: *U.S. Geological Survey Open-file Report 2013-1006*, p. 6.
- Banks, D., Markland, H., Smith, P. V., Mendez, C., Rodriguez, J., Huerta, A. & Saether, 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, pp. 141-166.
- Calvo, E. J. (2018). Almacenamiento de energía: presente y futuro de baterías de litio. *Ciencia e Investigación*, 68(2), pp. 5-21. Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias.
- Calvo, E. J. (2017). Procesos de extracción de litio de sus depósitos en salares argentinos. En Baran, E. J., (Ed.). *Litio: un recurso natural estratégico desde los depósitos minerales a las aplicaciones tecnológicas*, pp. 69-83. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Crespo, P., Palma, H., Quintanilla, J. y Quispe, L. (1987). *Tratamiento químico de salmueras del salar de Uyuni-Potosí*. Informe No. 7. Convenio UMSA-ORSTOM. Instituto de Investigaciones Químicas FCPN, p. 81 y Anexos.
- Flexer, V., Baspineiro, C. F. & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for Green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, 639, pp. 1188-1204.

- Marazuela, M. A., Vásquez-Suñe, E., Ayora, C., García-Gil, A. & Palma, T. (2019). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: the damping capacity of salt flats. *Science of the Total Environment*, 654, pp. 1118-1131.
- Obaya, M. (2019). Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en el Estado Plurinacional de Bolivia. *Documentos de Proyectos (LC/TS. 2019/49)*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Servant, M. & Fontes, J. C. (1978). Les lacs Quaternaires des hauts plateaux des Andes Boliviennes, premières interprétations paleoclimatiques. *Cab. ORSTOM Géol.*, 10(1), pp. 9-23.
- Rettig, S. L., Jones, B. F. & Risacher, F. (1980). Geochemical evolution in the salar of Uyuni. *Chem. Geol.*, 30, pp. 57-79.
- Risacher, F. & Armendia, A. (1986). *Primeros sondeos en el salar de Uyuni*. Bolivia. ORSTOM.
- Risacher, F. & Fritz, B. (1995). *Evolución cuaternaria del salar de Uyuni, Altiplano Central, Bolivia*.
- Risacher, F. & Fritz, B. (1991a). Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chemical Geology*, 90, 2011-231.
- Risacher, F. & Fritz B. (1991b). Geochemistry of Bolivian salar, Lipez, southern Altiplano: origin of solutes and brine evolution. *Geochemica and Cosmochemica Acta*, 55(3), pp. 687-705.
- Risacher, F. & Fritz, B. (2000). Bromine geochemistry of salar de Uyuni and deeper salt crusts, Central Altiplano, Bolivia. *Chemical Geology*, 167, pp. 373-392.
- Sieland, R. (2014). Hydraulic investigation of salar de Uyuni, Bolivia. Thesis for: Dr. rer. nat., *FOG Freiberg Online Geosciences* 37.
- Tardy, Y. (1969). Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Ser. Carte Géol. Als. Lorr.*, 31, p. 199.
- Wulfsberg, G. (2000). *Inorganic Chemistry*. U.S.A. University Science Books.

Agua y litio: una relación muy cercana.

Situación de los recursos hídricos en la zona del salar de Uyuni y su relación con el proyecto de industrialización del litio en Bolivia

Gonzalo Mondaca

Introducción

En la parte sur de la planicie de la cordillera de Los Andes, conocida como altiplano por su altura —en promedio 3.800 m s. n. m.—, se encuentra el salar de Uyuni. Es una formación geológica similar a otras existentes en toda la región andina de Sudamérica, pero se destaca por su gran extensión: 10.000 km².

El salar de Uyuni se ubica en Bolivia, en el sudoeste del departamento de Potosí. Está en medio de una región que desde la época colonial es escenario de actividades mineras de explotación de minerales polimetálicos con valiosos contenidos de plata (Ag), estaño (Sn), zinc (Zn), plomo (Pb), cobre (Cu), bismuto (Bi), antimonio (Sb), oro (Au) y otros metales.

Rodeado de zonas con actividad volcánica que se remonta al periodo Cuaternario, el salar de Uyuni es el resultado de un largo proceso de desertiza-

ción que llegó a secar el lago Tauca (48.000 a 80.000 km), formado entre 13.000 a 13.500 años antes del presente (AP). Una sucesión intermitente de largos periodos de sequía, que inició entre 10.500 y 7.000 años AP, formó los salares de Uyuni y Coipasa y manteniendo un tercio del espejo de agua en relación a su tamaño original, que actualmente es el lago Poopó (Molina-Carpio, 2007).

El salar de Uyuni, por las particulares características de su historia geológica, alberga enormes recursos de sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{-2}) y litio (Li). Estos y otros elementos químicos se acumularon en un proceso natural de erosión y transporte por escurrimiento desde las cuencas circundantes y evaporación, que los concentraron en depósitos subsuperficiales de agua salada (salmueras) por debajo de la costra salina (Molina-Carpio, 2007; Gaviria y otros, 2020).

De los recursos del salar, el litio destaca por sus múltiples usos en la industria de los lubricantes, las piezas de cerámica, las aplicaciones de la energía atómica y la fabricación de acumuladores eléctricos con alta capacidad de carga y, además, relativamente livianos. Estas características lo ponen en el centro de un proceso mundial de transición energética, que tiene el objetivo de reducir el uso de combustibles fósiles mediante el desarrollo de la movilidad eléctrica y el aumento de la eficiencia de acumuladores eléctricos o baterías.

Las perspectivas de uso del litio que se estudiaron desde la década de 1970 impulsaron en Bolivia una intensa investigación por parte de las universidades y la cooperación internacional. Destacan el trabajo de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) de La Paz, la antigua Oficina de Investigación Científica y Técnica en el Extranjero (ORSTOM) de Francia y la Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF) de Potosí.

En 1980 se inició el proceso de organización entre el Estado y los organismos e instituciones regionales con el objetivo de explotar litio y otros recursos del salar de Uyuni en sociedad con empresas extranjeras. Ello despertó una creciente expectativa por el promisorio “oro blanco”, sin embargo, en 1991, la vulneración del marco legal y procedimental vigente, motivada por intereses particulares al interior del gobierno de turno, desembocó en un

conflicto social alrededor del primer contrato de explotación con la empresa Lithium Corporation (LITHCO). El convenio fue cuestionado por otorgar ventajas al socio extranjero, que emulaban un sistema de explotación que, en la percepción de los actores locales, no dejaría ganancias significativas, así se repetiría una larga historia de saqueo de los recursos naturales.

Esta experiencia dejó una profunda huella en la conciencia colectiva acerca del rol del Estado como protector de los recursos naturales y responsable de establecer condiciones de asociación, que contribuyan verdaderamente al desarrollo regional y nacional. Para el final de la primera década del siglo XXI, se incorporó el paradigma de la industrialización y las organizaciones locales, particularmente la Federación Sindical Única de Trabajadores Campesinos del Sudoeste (FRUTCAS), promovieron el desarrollo del Proyecto Nacional de Industrialización del Litio.

El paradigma de la industrialización tuvo como antecedente la ampliación de las atribuciones de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) y se consolidó en 2008 con el Decreto Supremo 29496, que en su artículo 1 “declara de prioridad nacional la industrialización del salar de Uyuni para el desarrollo productivo, económico y social del departamento de Potosí”. Inmediatamente, la Dirección Nacional de Recursos Evaporíticos (DNRE) y la COMIBOL, con la conformación del Comité Científico de Investigación para la Industrialización de los Recursos Evaporíticos de Bolivia (CCII-REB), iniciaron la construcción de una planta piloto para la producción de carbonato de litio (Li_2CO_3) en el extremo sur del salar (Obaya, 2019).

En 2010 se creó la Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos (GNRE) en la estructura de la COMIBOL, en sustitución de la DNRE. Su objetivo es implementar la Estrategia Nacional de Industrialización de los Recursos Evaporíticos. Por último, en 2017, nació la Empresa Pública Yacimientos del Litio Bolivianos (YLB) con la misión de “realizar las actividades de toda la cadena productiva del litio y los recursos evaporíticos: prospección, explotación, beneficio o concentración, instalación, implementación, puesta en marcha, operación y administración de complejos de química inorgánica, industrialización y comercialización” (YLB, 2018).

La estrategia nacional estableció tres fases generales: investigación y plantas piloto; producción industrial nacional, y materiales catódicos y baterías de litio. Obaya (2019) destaca dos características: i) un alcance que plantea llegar hasta la industrialización de baterías de litio y ii) la restricción para la participación de empresas privadas en el procesamiento de los recursos del salar, lo que deja solo la posibilidad de colaboración en la producción y comercialización de productos con valor agregado —baterías y materiales catódicos— y la transferencia de tecnología.

Las tres etapas de la estrategia avanzaron de forma paralela a lo largo de 10 años, sin embargo, no se cumplieron los plazos previstos, debido a varios factores entre los que resalta la complejidad de los procesos de adaptación a las condiciones particulares del salar de Uyuni. Así, por ejemplo, la fase uno no superó las dificultades relacionadas con una significativa generación de residuos sólidos —especialmente una combinación de sulfato de calcio (CaSO_4), hidróxido de magnesio ($\text{Mg}[\text{OH}]_2$) y boratos— en las primeras etapas de procesamiento de las salmueras, que tenían como objetivo reducir la cantidades de magnesio presente en la salmuera y la relación magnesio: litio ($\text{Mg}:\text{Li}$) y facilitar la separación de este último en procesos posteriores (Guzmán, 2014).

Desde el inicio de su implementación la estrategia nacional planteó diversas inquietudes acerca de la generación de residuos y el uso de agua y energía. En 2011 la GNRE estimó un consumo de $5,1 \text{ Mm}^3/\text{año}$ para la producción piloto e industrial de carbonato de litio (GNRE, 2011). La memoria institucional de 2017 reporta un consumo total de $5.506,88 \text{ m}^3$ de agua, sin especificar la frecuencia de la medición —horaria, diaria, mensual— (YLB, 2017). Además, el acta de la consulta pública del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental de la Planta Industrial de Carbonato de Litio, elaborada por la consultora VIVENS SRL, señala que la respuesta a las consultas sobre el consumo de agua fue:

YLB, a través del Ing. Parra, [indica que] 30 metros cúbicos sería el consumo. Lo que se extrae de San Gerónimo está sometido a flujómetros, y se controla la cantidad de agua. Se hacen análisis mensuales de uso de agua. Para la planta a ser implementada, se utilizaría una fuente semisalada. (YLB, 2020)

El acta no precisa el tiempo de explotación para los “30 metros cúbicos” —¿en un día, un mes, una hora?— ni especifica cuál sería la “fuente de agua salada” a ser utilizada. En realidad, el mismo estudio de la planta de carbonato de litio en su Anexo 7 reporta un consumo de 22,66 m³/h, alcanzando los 198.466,56 m³/año (YLB, 2020). De esta forma, la existencia de información parcial y diferente —dependiendo del contexto— genera una permanente incertidumbre acerca del verdadero impacto ambiental del proyecto y de su desarrollo en general.

Al mismo tiempo, pese a los avances en el desarrollo de infraestructura, los objetivos de producción están muy lejos de ser alcanzados, incluso las capacidades de producción previstas se redujeron significativamente, de 700.000 t/año de cloruro de potasio (KCl) a 350.000 y de 30.000 t/año de carbonato de litio a 15.000 (YLB, 2018). En 2019 se produjeron 420 t de carbonato de litio y 26.741 t de cloruro de potasio; los porcentajes de eficiencia productiva respecto de la capacidad productiva declarada fueron de 2,8% y 7,64%, respectivamente (YLB, 2020a).

Una revisión de las memorias y documentos de rendición de cuentas de la GNRE (2011-2016) y de la YLB (2017-2018) evidenció que el proyecto planificó una inversión de 904 MUSD, pero recibió asignaciones presupuestarias por 919 MUSD entre 2012 y 2019. En dicho periodo ejecutó 480,5 MUSD, 52,29% de su presupuesto¹.

El proyecto de industrialización del litio se ubica en el extremo sureste del salar de Uyuni y tiene a la comunidad Llipi del municipio Colcha-K como principal colindancia. Sin embargo, sus instalaciones se encuentran repartidas entre aquellas que están sobre la costra salina (provincia Daniel Campos) y las que están en tierra firme (provincia Nor Lipez) (Tabla 1). Esta diferenciación de los lugares del emplazamiento es importante si la distribución de los ingresos del proyecto sigue la actual normativa sobre regalías definida en la Ley Minera 535 de 2014, aspecto complejo que no se desarrolla en este artículo.

1 La Memoria 2011 de la GNRE no presenta datos del presupuesto asignado ni sobre su ejecución, mientras que las memorias de las gestiones 2012 y 2013 tienen datos de los presupuestos asignados, pero no de los ejecutados. En 2014 no se publicó la memoria institucional correspondiente.

Tabla 1 Distribución de la infraestructura del Proyecto Nacional de Industrialización del Litio

PROVINCIA DANIEL CAMPOS-COSTRA SALINA DEL SALAR DE UYUNI	PROVINCIA NOR LÍPEZ-CUENCA DEL RÍO GRANDE
Piscinas de evaporación	Campamento de Llipi
Pozos de extracción de la salmuera	Pozos de agua dulce-zona San Gerónimo
Campamento temporal	Incineradora de residuos sólidos
Planta modular e industrial de cloruro de potasio	
Planta modular e industrial de carbonato de litio	

El presente artículo proporciona información sobre el proyecto a partir de la revisión de dos de sus Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental:

- Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral (EEIA-AI) del Proyecto Integral de la Salmuera en el Salar de Uyuni-Planta Modular y Planta Industrial de Cloruro de Potasio, agosto de 2012. Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) y Consultora SIMBIOSIS-Servicios Integrales en Medio Ambiente (En adelante: EEIA-AI KCl)
- Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral. Desarrollo Integral de las Salmueras del Salar de Uyuni-Planta Industrial de Carbonato de Litio Yacimientos del Litio Boliviano, 2020. Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) y Consultora VIVENS Environmental Consulting SRL (En adelante: EEIA-AI Li_2CO_3).

Agua y producción de cloruro de potasio

En el caso de la planta modular de cloruro de potasio, el proceso de encajado, “línea de cloruros”, corresponde al certificado de dispensación correspondiente al proyecto piloto de la planta de carbonato de litio, por lo que no forma parte del EEIA-AI KCl. Sin embargo, dicho documento reconoce que el mismo proceso sigue siendo aplicado. Al respecto, ya en 2014, el

Centro de Estudios para el Desarrollo Laboral y Agrario (CEDLA) advirtió sobre los riesgos ambientales de dicha técnica y sus desventajas económicas, además, denunció que la investigación sobre una “línea de sulfatos”, como alternativa tecnológica al encalado, fue abandonada por la GNRE y la COMIBOL a mediados de 2013 (Guzmán, 2014).

El EEIA-AI KCl incluye el proceso de flotación de la planta modular o piloto y establece un balance hídrico y másico según el cual se requieren 5,16 L de silvita —un producto del encalado— y 0,45 m³ de agua dulce para producir una tonelada de cloruro de potasio. Ello representa 50.950,82 m³/año de silvita y 5.400,00 m³/año de agua dulce.

Para las piscinas industriales de encalado de la planta de cloruro de potasio, el estudio de impacto ambiental reporta un balance másico de 48,73 m³ de salmuera y 2,42 m³ de agua dulce por tonelada de este compuesto. Si se considera el recorte de las expectativas de producción, mencionado en la introducción, estos requerimientos corresponderían a 29.166,67 t/mes de cloruro de potasio (350.000 t/año). En consecuencia, las piscinas industriales de encalado consumirían 17.055.501,95 m³/año de salmueras y 847.000,10 m³/año de agua dulce.

Para la planta industrial de flotación, último proceso en la producción, se requieren 0,45 m³ de agua dulce por tonelada de cloruro de potasio y ello representa un consumo de 157.500,02 m³/año de agua dulce.

Con estos datos y los de los consumos de agua dulce reportados para los campamentos modular (costra salina) y central (Llipi), el consumo total de agua dulce para la producción de cloruro de potasio es de 1 millón de m³/año (Ver Tabla 2). Mientras, el consumo de aguas saladas, silvita de la planta modular y salmuera para la planta industrial de encalado alcanzaría los 17.117.661.949,20 m³/año (Ver Tabla 3).

Por último, el EEIA-AI KCl presenta un balance másico de las etapas de evaporación (Ver Figura 1) y señala que los flujos de evaporación V1 y V2 representan el 54,4% de las entradas (COMIBOL, 2012). Así, el volumen de agua evaporada es de 1.446.478,00 t/mes, es decir, 1.185.637,70 m³/año.

Tabla 2 Volumen de agua industrial (agua dulce) demandado por la planta de cloruro de potasio. La producción es de 350.000 t/año.

Fuente: Con base en datos del EEIA-AI KCl (2012, II-70 y II-73)

N°	USO	M ³ /MES	M ³ /AÑO	COMENTARIOS
1	Planta modular de flotación de cloruro de potasio	450,00	5.400,00	0,45 m ³ /t KCl
2	Planta industrial de encalado	70.583,34	847.000,10	2,42 m ³ /t KCl
3	Planta industrial de flotación	13.125,00	157.500,02	0,45 m ³ /t KCl
4	Consumo de agua en campamento de la planta modular	279,00	3.348,00	180 personas
5	Consumo de agua en campamento de la planta industrial	480,00	5.760,00	320 personas
Total (m³)		84.917,34	1.019.008,11	
Total (L)		84.917.342,90	1.019.008.114,80	

Tabla 3 Volumen de aguas saladas (silvita y salmuera) demandado por la planta de cloruro de potasio. La producción es de 350.000 t/año*.

Fuente: Con base en datos del EEIA-AI KCl (2012: II-70 y II-72)

N°	USO	T/MES	M ³ /MES	M ³ /AÑO	COMENTARIOS
1	Planta modular de flotación de cloruro de potasio (silvita)	6.319,60	5.180,00	62.160,00	Densidad: 1,22 t/m ³ **
2	Planta industrial de encalado	1.733.976,03	1.421.291,83	17.055.501,95	
Total (m³)		1.740.295,63	1.426.471,83	17.117.661,95	
Total (l)			1.426.471.829,10	17.117.661.949,20	

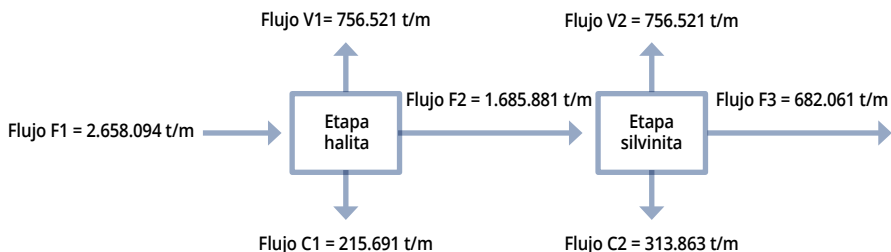
* EEIA-AI KCl, producción de 29.166,67 t/mes de cloruro de potasio y 48,73m³ de salmuera por tonelada de cloruro de potasio.

** EEIA-AI KCl, apartado 2.4.2.1.4. Proceso de flotación, pp. 2-44.

De forma preliminar, se concluye que las limitaciones de información hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica determinaron seriamente la calidad de la evaluación del impacto ambiental del subproyecto Planta Modular y Planta Industrial de Cloruro de Potasio. En este caso se vulneraron

Figura 1 Balance másico-etapas de evaporación.

Fuente: EEIA-AI KCl (2012, pp. 2-68)



flagrantemente los principios del EIA, que establecen que es fundamental contar con la “suficiente información para determinar y evaluar los efectos ambientales” (PNUMA, 1987). El EEIA-AI KCl dice:

La falta de información cuantitativa que caracterice a las fuentes de aguas subterráneas en el área de estudio, limitó el alcance de la evaluación de las interacciones entre las fuentes de agua superficial y subterránea; así como también, la evaluación de impactos potenciales de las actividades mineras sobre la calidad de aguas subterráneas y aguas para consumo humano en la región. (COMIBOL, 2012, p. 47)

A ello se añade una premeditada intención por minimizar los impactos ambientales y, particularmente, aquellos relacionados con el uso de recursos hídricos, aspecto que se evidencia en las omisiones y adiciones, arbitrarias y carentes de respaldo técnico-científico, presentadas en la metodología del EEIA-AI KCl. Este establece, en el apartado 7.10., criterios de valoración de los impactos ambientales sin presentar referencia bibliográfica ni legal alguna. En la Tabla 7.11. Criterios para valoración cuantitativa y jerarquización de impactos incorpora de forma arbitraria el criterio de “sensibilidad local” (Figura 2).

El criterio de sensibilidad local no es mencionado en la Guía de Identificación de Impactos Ambientales del Reglamento para la Prevención y Control Ambiental (RPCA, 1994). El RPCA, en su artículo, 34 establece que el

Figura 2 El criterio de sensibilidad local, según el EEIA-AI KCI.

Fuente: EEIA-AI KCI (2012, pp. 7-14)

Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos - COMIBOL
 Desarrollo Integral de la salmuera en el Salar de Uyuni – Planta Modular y Planta Industrial de Cloruro de Potasio
Capítulo 7: Evaluación de Impactos Ambientales

Criterio	Evaluación	Descripción	Valores
Sensibilidad local (S)	Baja	El área se encuentra muy degradada o las condiciones hacen que los impactos potenciales ambientales no sean significativos.	1
	Media	El área tiene moderado nivel de intervención o las condiciones hacen que los impactos potenciales ambientales sean significativos	2
	Alta	El área no tiene intervención o sus condiciones hacen que los impactos potenciales ambientales sean muy significativos	3

Fuente: Elaboración propia. 2012.

EEIA “debe incluir”, entre otras referencias, la “identificación de las metodologías utilizadas para la evaluación ambiental”. Sin embargo, no determina la obligatoriedad para el cumplimiento de las disposiciones del Sistema Nacional de Control de Calidad Ambiental (SNCCA), en el que se encuentra la mencionada guía.

El mayor problema con el inventado criterio de sensibilidad local está en la descripción de sus indicadores (Ver Figura 1), ya que se da a entender que la existencia de impactos previos reduce la importancia de los previstos. El EEIA-AI KCI también añade el criterio de “intensidad” e ignora los de “persistencia”, “acumulación” y “magnitud”, por lo que existe evidencia de una premeditada intención por minimizar la importancia y valoración de los impactos ambientales.

Agua y producción de carbonato de litio

En el caso de la producción de carbonato de litio, los datos corresponden al Certificado de Dispensación-Desarrollo Integral de las Salmueras del Salar de Uyuni-Planta Piloto de Carbonato de Litio. De modo que las demandas de recursos hídricos para el proceso piloto no se incluyen en este artículo.

Tabla 4 Volumen de mezcla de sal (salmuera saturada) y agua de proceso (agua dulce) demandado por la planta industrial de carbonato de litio.

Fuente: Con base en datos del EEIA-AI Li₂CO₃ (2020, Anexo 7, p. 1)

N°	TIPO DE INSUMO	t/h	m ³ /h	m ³ /d	m ³ /mes	m ³ /año	COMENTARIOS*
1	Salmuera saturada	18,67	15,30	367,20	11.016,00	134.028,00	Densidad: 1,22 t/m ³
2	Agua de proceso	22,66	22,66	543,74	16.312,32	198.466,56	Densidad: 1,0 t/m ³
Total		41,32	37,96	910,94	27.328,32	332.494,56	
Total (l)		37.956,00	910.944,00	27.328.320,00	332.494.560,00		

* El dato de la densidad proviene del EEIA-AI KCl (2020, pp. 2-44).

En el caso de la planta industrial de carbonato de litio, los volúmenes de agua utilizada se dividen en mezcla de sal (salmuera saturada) o materia prima en bruto y agua de proceso (agua dulce). De acuerdo con el balance másico presentado en el Anexo 7 del certificado, por hora de actividad, se utilizan 18.666 t de salmuera y 22,656 t de agua dulce. Para expresar estos valores en metros cúbicos, se usó como referencia una densidad de 1,22 t/m³ para la salmuera y 1,0 t/m³ para el agua. La planta de carbonato de litio necesitará 134.028,00 m³/año de salmuera saturada y 198.466,56 m³/año de agua de proceso.

Como se mencionó en la introducción, el proyecto de industrialización del litio no proporcionó información completa sobre sus demandas de agua. Esta situación llegó al extremo de que la consultora VIVENS Environmental Consulting SRL, responsable de elaborar el EEIA-AI Li₂CO₃, tampoco tuvo acceso a los estudios que elaboró la GNRE (2013) con el objetivo de “conocer las características de la cuenca del salar de Uyuni, las condiciones que dieron lugar a la formación del depósito, condiciones hidrológicas y otras”.

En 2016, cuatro años antes de concluido el EEIA-AI Li₂CO₃, la GNRE concluyó el *Estudio hidrogeoquímico de la cuenca del salar de Uyuni*. Este tuvo la finalidad de “determinar un modelo que permita caracterizar desde el punto de vista hidrogeoquímico toda la cuenca del salar de Uyuni” y también

generó un mapa de distribución del litio en aguas superficiales en época húmeda (GNRE, 2016).

La investigación mencionada elaboró también mapas geoquímicos de los diferentes elementos para cada una de las subcuencas del salar de Uyuni e hizo 212 muestreos de aguas superficiales, 50 de subterráneas y 106 de sedimentos en la cuenca del Río Grande. Adicionalmente, en las cuencas de los ríos Colcha-K, Colorado y Llica, realizó 135 análisis de aguas superficiales, 35 de subterráneas y 155 de sedimentos. También evaluó 27 parámetros físico-químicos y un análisis multielemental, que abarcó 38 elementos en aguas superficiales, 38 en subterráneas y 48 en sedimentos de corriente (GNRE, 2016).

Los datos obtenidos propiciaron la generación de un monitoreo mensual de la desembocadura del Río Grande hacia el salar de Uyuni, se tienen datos mensuales de las gestiones 2013, 2014, 2015 y 2016. (GNRE, 2016)

Los estudios continuaron y en 2018 YLB dijo que sus investigaciones buscaban:

El entendimiento del flujo dinámico de las salmueras dentro del yacimiento, las dimensiones de los acuíferos portantes de salmueras, conocer los volúmenes extraíbles, la química de dichas salmueras y obtener un modelo dinámico a detalle del yacimiento con las estimaciones del recurso para finalmente saber la reserva con la que se cuenta en el salar de Uyuni. (GNRE, 2011)

Los resultados de las investigaciones, hasta la fecha, no son de acceso público y, al no haber sido utilizados para la elaboración del EEIA-AI Li_2CO_3 , llevaron una vez más a una inaceptable falta de información para evaluar de forma adecuada los impactos ambientales sobre el factor agua.

Así como observó la consultora TERRAE, que también analizó los documentos de evaluación de impacto ambiental, el EEIA-AI Li_2CO_3 tiene significativos vacíos de información y sobre diferentes aspectos hidrogeológicos confunde promesas de realización de estudios con la proposición de medidas de mitigación y procesos de restauración: “La restauración de los cursos de agua estará dada por los estudios hídricos a realizarse como parte de las medidas de mitigación del proyecto” (YLB, 2020) .

Recursos hídricos para la industrialización del litio

Uno de los elementos más importantes en la extracción de salmueras consiste en el uso de agua. De esta manera, el total de agua demandada para la industrialización del litio llegará a 18.469.164,62 m³/año o 18,47 Mm³/año (Ver Tabla 5).

Tabla 5 Consumo total de recursos hídricos de la industria del litio en Bolivia.

Fuente: Con base en EEIA-AI KCl (2012) y EEIA-AI Li₂CO₃ (2020)

INSTALACIÓN	CONSUMO ANUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (m ³)			PRODUCCIÓN ANUAL ESPERADA (t/año)	RELACIÓN CONSUMO DE AGUA Y PRODUCCIÓN (m ³ /t)
	SALMUERA (m ³)	AGUA DULCE (m ³)	TOTAL (m ³)		
Planta de cloruro de potasio	17.117.661,95	1.019.008,11	18.136.670,06	350.000,00	51,82
Planta de carbonato de litio	134.028,00	198.466,56	332.494,56	15.000,00	22,17
Total (m³)	17.251.689,95	1.217.474,67	18.469.164,62		
Total (Mm³)	17,25	1,22	18,47		

* Si la producción fuera la que se proyectó al principio, es decir, 700.000,00 t de cloruro de potasio, el consumo total de la planta sería de 36.517.951,32 m³ o 36,52 Mm³.

La cantidad total de agua a ser extraída del subsuelo es mayor a la que saca la Minera San Cristóbal (MSC), 14,6 Mm³/año. Molina-Carpio (2007) considera a esta actividad minera como la “más grande existente en Bolivia”. Sin embargo, el consumo de 1,22 Mm³/año de agua dulce es mucho menor que la proyección de 5,1 Mm³/año, que hizo la GNRE en 2011 (GNRE, 2011), probablemente debido a las reducciones hechas posteriormente a las expectativas de producción.

De todas maneras, se destaca que, al no tener información suficiente sobre la dinámica de las aguas subterráneas, su calidad, su clasificación (agua dulce/salmueras), su distribución y una estimación de su cantidad y disponibilidad,

resulta imposible hacer una valoración completa del impacto ambiental y sus posibles efectos.

Un estudio elaborado por la Minera San Cristóbal (2006) y citado por Molina-Carpio (2007) estima una recarga hídrica de 3,2 Mm³/año en la cuenca del Río Grande. Dicho valor fue considerado por el mencionado experto como “sobrestimada”, sin embargo, es un referente optimista que muestra que el volumen total de extracción de recursos hídricos es seis veces mayor que la recarga que tiene lugar en la principal cuenca tributaria del salar de Uyuni.

Surgen entonces varias preguntas de investigación acerca de si la recarga existente en toda la cuenca del salar es significativamente mayor que la estimada para la cuenca del Río Grande, ¿cuánta agua de lluvia se infiltra en el salar?, ¿cuál es su balance hídrico?, ¿cuáles son los flujos de interacción entre las aguas dulces circundantes y las salmueras del interior?, ¿puede la explotación intensiva de salmueras afectar a los acuíferos de agua dulce circundantes? y ¿cuánta agua dulce es posible extraer?

Los residuos del proyecto de industrialización del litio

Residuos industriales

Como se mencionó en el apartado “Agua y producción de cloruro de potasio”, el proceso de encalado es aún parte de la producción del proyecto de industrialización del litio. Pese a las promesas de un cambio de tecnología y las anunciadas investigaciones sobre el tema (Guzmán, 2014), los documentos de la EIA confirman que la línea de cloruros no ha sido superada satisfactoriamente, al menos respecto de la generación de residuos industriales.

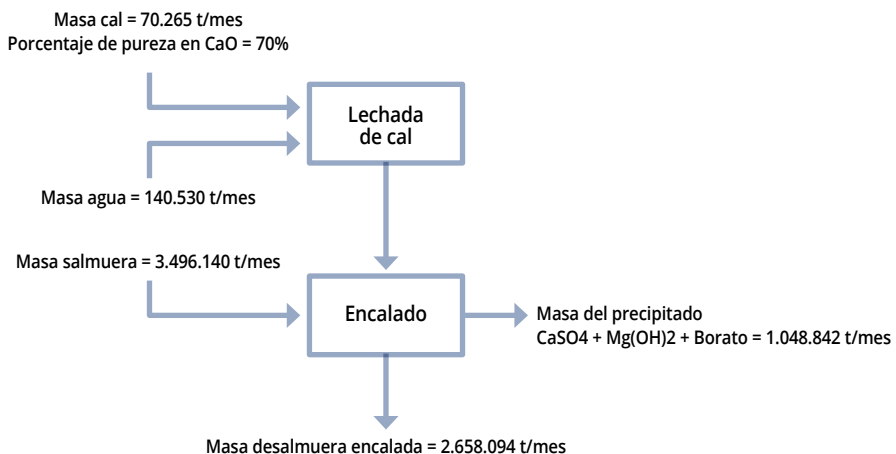
En la planta industrial de cloruro de potasio, el primer proceso es el encalado, donde la salmuera virgen se combina con una lechada de cal (hidróxido de calcio [Ca(OH)₂]). La lechada se prepara con la disolución de cal viva (óxido de calcio [CaO]) en agua fresca proveniente del pozo San Gerónimo. El encalado permite eliminar sulfatos con la precipitación de sulfato de calcio (yeso [CaSO₄]) y, en menor cantidad, hidróxido de magnesio (Mg(OH)₂) y borato de calcio (Ca₃(Bo₃)₂). La Figura 3 muestra el balance másico indicado en el EEIA-AI KCl (YLB, 2012).

La porción precipitada, compuesta fundamentalmente por yeso, alcanza un total de 1.048.842 t/mes. El EEIA-AI KCl no especifica el tipo de yeso industrial producido, semihidratado *alfa* o *beta*, por tanto, a partir de las densidades de referencia dadas para ambos casos (OIT/OMS/CE, 2018), el volumen que mensualmente se obtendría estaría entre 344.744,03 y 361.784,55 m³ y anualmente sería entre 4.136.928,36 y 4.341.414,60 m³.

Para comprender la magnitud de residuos generados, se usa como referente el principal edificio administrativo del Estado, la Casa Grande del Pueblo. Dicha edificación tiene una altura de 120 m y la *suite* presidencial, una superficie de 1.000 m² y un volumen aproximado de 120.000 m³ (BBC Mundo, 2018). Esto significa que mensualmente se fría un volumen comparable a tres veces la Casa Grande del Pueblo. No obstante, estos datos requieren una actualización, ya que las expectativas de producción fueron reducidas de 700.000 a 350.000 t/año de cloruro de potasio. Las razones de esta decisión no fueron aclaradas por YLB, pero es muy probable que una sea la significativa cantidad de residuos industriales que se generaría.

Figura 3 Balance másico para la etapa de encalado en la planta industrial de cloruro de potasio.

Fuente: EEIA-AI KCl (2012, pp. 2-27)



El EEIA-AI KCI (2012) afirma que el precipitado de sulfato de calcio + hidróxido de magnesio + borato de calcio será “mezclado con sal de la costra del salar para la construcción, estabilización y mantenimiento de terraplenes y taludes en las piscinas industriales”. Sin embargo, no especifica el lugar ni las condiciones de almacenamiento, pese a considerar que la “generación de partículas suspendidas” es clasificado como un impacto “negativo altamente significativo”. Además, no se cumplió el compromiso de elaborar estudios sobre el impacto de la dispersión de partículas (COMIBOL, 2012).

En cambio, en la planta de carbonato de litio se recuperan diferentes sustancias, algunas son residuos sin valor, otras se recirculan y otras son potenciales subproductos. El proyecto instaló sistemas de manejo para cada una y tiene previsto el desarrollo de planes de aprovechamiento específicos en el marco del Complejo Industrial de Desarrollo Integral de Salmueras del Salar de Uyuni (YLB, 2020).

Respecto del manejo de residuos y sustancias peligrosas industriales, el almacenamiento en piscinas instaladas en el salar cobra especial importancia por la superficie que ocupan, casi 34 ha (339.960 m²). El EEIA-AI Li₂CO₃ estima que, cuando la planta opere con toda su capacidad, el volumen generado será de 150.472,80 m³/año. La Tabla 6 presenta las características de su almacenamiento en piscinas.

La acumulación constante de residuos con el potencial de convertirse en subproductos lleva a considerar que la investigación orientada a su aprovechamiento debiera ser priorizada para evitar que estos se conviertan en pasivos ambientales. Al respecto, la consultora TERRAE también señaló que es imposible evaluar adecuadamente la seguridad que brindan las piscinas, en caso de rebalse o inundación, si no se cuenta con un análisis pluviométrico que identifique, entre otros aspectos, la probabilidad y frecuencia de eventos extremos de lluvia. Esta información no fue presentada en ninguno de los estudios de impacto ambiental. (Gaviria y otros, 2020)

El desarrollo de sistemas de seguridad para garantizar un adecuado manejo de los residuos industriales ha sido constante, de acuerdo con la información de las memorias de la GNRE y YLB. Sin embargo, hay una incertidumbre

Tabla 6 Almacenamiento de residuos de procesos en piscinas en la planta industrial de carbonato de litio.

Fuente: EEIA-AI Li₂CO₃ (2020, pp. 1-63)

Nº	PISCINA	SUPERFICIE [m ²]	CONTENIDO	CANTIDAD [m ³ /año]	COMENTARIOS
1	Bischofita	89.100,00	Torta de filtro de la centrifugadora de bischofita (cloruro de magnesio hexahidratado [MgCl ₂ ·6H ₂ O])	26.982,00	Potencial subproducto
2	Sal de Glauber	57.600,00	Sulfato de sodio hidratado-sal de Glauber (Na ₂ SO ₄)	26.262,00	Peligro para la salud = 2 Potencial subproducto
3	Mezcla de sales	63.360,00	Torta filtro lavada	21.855,60	
4	Hidróxido de magnesio (Mg[OH] ₂)	49.500,00	Torta filtro de hidróxido de magnesio	5.626,80	Potencial subproducto
5	Escombrera de yeso	61.200,00	Torta filtro de yeso lavada	16.527,60	
			Torta de filtro lavada	1.483,20	
			Torta de filtro licor de soda	14,40	
			Torta de filtro de la centrifugadora de boratos	1.778,40	
6	Ácido clorhídrico (HCl)	19.200,00	Solución regenerante de ácido clorhídrico de eliminación de boro 1	30.657,60	Corrosivo Peligro para la salud = 3 Peligroso para el ambiente. Se recicla.
7	Hidróxido de sodio (NaOH)		Solución regenerante de hidróxido de sodio de eliminación de boro 1	19.285,20	Reactividad = 2 Peligro para la salud = 2 Se recicla.
Total		339.960,00		150.472,80	

importante respecto de la composición de las salmueras, como resultado de un proceso natural de transporte de diferentes elementos químicos desde la parte alta de la cuenca hacia el salar. Dicho traslado es particularmente importante en el caso del Río Grande, que es una cuenca con actividad minera tradicional.

La GNRE (2016) verificó la dinámica mencionada, pero no dio información completa acerca de los aspectos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos de la composición, dinámica y cantidad de los elementos químicos presentes en las salmueras. Por ello, como concluyó TERRAE (Gaviria y otros, 2020), la principal debilidad de los estudios de impacto ambiental es la falta de soporte técnico. Resulta incomprensible que las investigaciones elaboradas desde 2012 no hayan sido utilizadas para establecer, con base en información técnica suficiente, los riesgos de contaminación en la materia prima del proyecto y los impactos ambientales potenciales.

En los estudios ambientales de las plantas de litio y potasio se minimiza el hecho de que el geosistema de las cuencas que vierten sus aguas al salar de Uyuni, y particularmente la del Río Grande de Lípez, genera muchos elementos químicos tóxicos como el arsénico (Banks y otros, 2004), metales pesados como el cadmio y el plomo, y que la concentración en los desechos de elementos tóxicos por los procesos industriales debe ser un problema estudiado y modelado para poder tener los impactos ambientales acotados y las medidas de manejo establecidas con sustento técnico-científico; máxime cuando los volúmenes de sales que se van a acumular en las piscinas de residuos suman varias decenas de miles de metros cúbicos cada año (Gaviria y otros, 2020).

La cuenca del Río Grande tiene fuentes de contaminación antrópica por actividades mineras abandonadas y en operación, por ejemplo, la emblemática Mina de Pulacayo. Por tanto, es necesario conocer en detalle los resultados de las investigaciones elaboradas por la GNRE y YLB sobre la composición de la salmuera y las isoconcentraciones de diferentes elementos químicos en el salar de Uyuni. Sin ello, es imposible confirmar la presencia de elementos tóxicos y su movilidad o no en los diferentes procesos industriales (Gaviria y otros, 2020).

Residuos peligrosos

La Tabla 7 resume las características más importantes de las sustancias peligrosas utilizadas en las plantas modular e industrial de cloruro de potasio. En esta se verifica la importante cantidad de insumos requeridos para el proceso de encalado, en el que la demanda de óxido de calcio (CaO) es de

Tabla 7 Características más importantes de las sustancias peligrosas utilizadas en las plantas modular e industrial de cloruro de potasio.

Fuente: Con base en el EEIA-AI KCI (2012, Anexo A-I, pp. 1 y 2)

Nº	NOMBRE	COMPOSICIÓN/ FÓRMULA	PELIGROSIDAD	OBJETIVO Y FORMA DE USO	CONSUMO MENSUAL	CONSUMO ANUAL
1	Cal apagada o hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	Irritante	Proceso de enca-lado Minimización de la presencia de sulfato (SO4-2), magnesio (Mg+2) y boro (B+3) en la salmuera	70.265,00 t	843.180,00 t
2	Óxido de calcio (cal viva)	CaO	Corrosivo	Proceso de enca-lado Minimización de la presencia de sulfato (SO4-2), magnesio (Mg+2) y boro (B+3) en la salmuera	70.265,00 t	843.180,00 t
3	ARMEEN TM-97	n-alkil amina	Irritante	Crear la propiedad hidrofóbica del cloruro de potasio	500,00 kg	6.000,00 kg
4	Ácido clor-hídrico	HCl	Corrosivo	Emulsionante de ARMEEN TM-97	10,00 kg	120,00 kg
5	MIBC	Metilisobutil carbinol	Irritante y tóxico	Espumante	50,00 kg	600,00 kg
6	Grasas	NA	Irritante	Funcionamiento de equipo/maquinaria pesada	100,00 kg	1.200,00 kg
7	Aceites y grasas	NA	Irritante	Funcionamiento de equipo/maquinaria pesada	1.904,75 L	22.857,00 L
8	Gasolina	NA	Irritante	Funcionamiento de equipo/maquinaria liviana	10.000,00 L	120.000,00 L
9	Diésel	NA	Irritante	Funcionamiento de equipo/maquinaria pesada	50.000,00 L	600.000,00 L
10	Pinturas	NA	Irritante	Construcción de plantas y campamentos	5.000 L	s/d
11	Acetileno industrial	C ₂ H ₂	Irritante	Soldadura/gas de combustión	35,00 kg	420,00 kg
12	Oxígeno industrial	NA	Irritante	Soldadura	27,00 kg	324,00 kg

843.180,00 t/año. En este caso, también es necesaria la actualización vinculada a la reducción de las expectativas de producción de cloruro de potasio, que bajó de 700.000 a 350.000 t/año.

Respecto del EEIA-AI Li_2CO_3 , en su Apéndice III, este presenta listas y datos relevantes sobre las sustancias utilizadas en la planta industrial (Tabla 8). La más usada es el óxido de calcio, con una demanda de 41.411 t/año.

En la planta industrial de carbonato de litio para el funcionamiento de los generadores eléctricos, maquinaria y vehículos se utilizarán 600.000 L/año de diésel y la misma cantidad de gasolina (Tabla 9). Mientras que en el campamento de Llipi para diferentes usos se emplean 25.425 t/año de gas licuado de petróleo (GLP), (Tabla10). Por último, la Tabla 11 reporta la cantidad total de las 82 sustancias peligrosas utilizadas en los laboratorios.

Tanto en el EEIA-AI KCl como en el EEIA-AI Li_2CO_3 no se especifican los datos ni se presentan las certificaciones de las empresas que prestarían los servicios de transporte y disposición final de residuos y sustancias peligrosas. Este aspecto es fundamental para hacer el seguimiento de adecuadas condiciones de transporte, tratamiento y disposición final.

En el caso de los aceites y lubricantes, que eventualmente deben ser reemplazados y almacenados de forma controlada, no se especifica el número de vehículos utilizados ni sus capacidades, por lo que resulta imposible evaluar si la cantidad de residuos es correcta. A partir de la información de los estudios de impacto ambiental, se estima que el proyecto de industrialización del litio consume 62,6 L/día.

El proyecto cuenta con un surtidor de combustibles para vehículos, sin embargo, ninguno de los estudios de impacto ambiental menciona los documentos ambientales que autorizan su funcionamiento ni la correspondiente Licencia para Actividades con Sustancias Peligrosas (LASP). Esta deficiencia no es menor si se considera que el consumo promedio es de 1.972,6 L/día de gasolina y 3.287,7 L/día de diésel.

Tabla 8 Sustancias peligrosas utilizadas en la planta industrial de carbonato de litio.

Fuente: Con base en el EEIA-AI Li₂CO₃ (2020, Apéndice III, pp. 28-36)

N°	NOMBRE	PELIGROSIDAD	CONSUMO ANUAL [t/año]	CONSUMO ANUAL [L/año]	PROCESO
1	Óxido de calcio (CaO)	Corrosivo	41.411.000		Precipitación de cloruro de calcio e hidróxido de magnesio
2	Gas natural comprimido	Explosivo/Irritante	25.425.000		Generación de vapor
3	Carbonato de sodio (Na ₂ CO ₃)	Reactivo	23.927.000		Precipitación de carbonato de litio
4	Dióxido de carbono (CO ₂)	Explosivo	1.648.000		Producción de carbonato de litio
5	Nitrógeno (N ₂) líquido refrigerado	Corrosivo/Explosivo	1.500.000		Producción de carbonato de litio
6	Ácido clorhídrico (HCl) 33,5%	Corrosivo	1.138.000		Intercambiador iónico Solución de limpieza del reactor Operación de piscinas de residuos
7	Hidróxido de sodio (NaOH) 50 %	Corrosivo	430.000		Lixiviación Intercambio iónico
8	Aguarrás (C ₁₀ H ₁₆)	Tóxico/Irritante		1.200.000	Solución de limpieza
9	Thinners	Tóxico /Irritante		1.200.000	Solución de limpieza

Tabla 9 Sustancias peligrosas utilizadas para el funcionamiento de generadores eléctricos, maquinaria y vehículos en la planta industrial de carbonato de litio.

Fuente: Con base en el EEIA-AI Li₂CO₃ (2020, Apéndice III, pp. 28)

N°	NOMBRE	PELIGROSIDAD	CONSUMO ANUAL	PROCESO
1	Diésel	Explosivo/irritante	600.000,00 L	Combustible para vehículos, maquinaria y generadores
2	Gasolina	Explosivo/tóxico	600.000,00 L	Combustible para vehículos

Tabla 10 Sustancias peligrosas utilizadas en el campamento de la planta industrial de carbonato de litio.Fuente: Con base en el EEIA-AI Li₂CO₃ (2020, Apéndice III, p. 28)

Nº	NOMBRE	PELIGROSIDAD	CONSUMO ANUAL [t/año]	PROCESO	LUGAR DE USO
1	Gas licuado de petróleo	Explosivo/Irritante	25.425.000	Usos domésticos	Campamento

Tabla 11 Sustancias peligrosas utilizadas en el laboratorio de la planta industrial de carbonato de litio.Fuente: Con base en el EEIA-AI Li₂CO₃ (2020, Apéndice III).

Nº DE SUSTANCIAS SÓLIDAS O EN POLVO	CONSUMO TOTAL [kg/año]	Nº DE SUSTANCIAS LÍQUIDAS	CONSUMO TOTAL [litros/año]	USOS
65	466.021	17	392.711	Cromatografía iónica Lavado y limpieza de material. Determinación de presencia de diferentes sustancias químicas.

Residuos domiciliarios y asimilables a domiciliarios

En el caso de los residuos domiciliarios y los asimilables a domiciliarios generados en los campamentos y en las diferentes instalaciones consideradas en el EEIA-AI KCl, la información es incompleta y contradictoria. En el "Anexo 10-1. Plan de Manejo de Residuos Sólidos" se reporta 31,2 t/mes; en el "Capítulo 2. Descripción del Proyecto", 0,89 t/mes, y en la "Tabla 2.43. Desechos producidos durante la operación de la planta industrial", 8,2 t/mes.

El EEIA-AI Li₂CO₃ presenta una clasificación más detallada de la generación de residuos domiciliarios y asimilables a domiciliarios (Tabla 12). El total es 20,25 t/mes. Sin embargo, no se cuantificó la generación de los siguientes residuos: escombros, geomembrana, plásticos PEAD (polietileno

de alta densidad), madera, envases no contaminados, envases contaminados con sustancias peligrosas, suelos contaminados y trapos y utensilios contaminados o en desuso. Por ello, la información también es incompleta.

Tabla 12 Cuantificación parcial de la generación de residuos sólidos genéricos, en el estudio de impacto ambiental de la planta de carbonato de litio.

Fuente: Con base en el EEIA-AI Li₂CO₃ (2020, Anexo 11, pp. 10-13)

TIPO DE RESIDUOS	PPC [kg/persona/día]	DIARIA [kg/día]	MENSUAL [kg/mes]
Orgánicos	0,50	200,00	6.000,00
Reciclables		5,00	150,00
No aprovechables - sanitarios	0,50	200,00	6.000,00
Especiales - chatarra		20,00	600,00
Peligrosos - hospitalarios	0,60	240,00	7.200,00
Peligrosos - cartuchos de tinta			100,00
Peligrosos- aceites usados			200,00
		Total (kg/mes)	20.250,00
		Total (t/mes)	20,25

La información del EEIA-AI Li₂CO₃ permite suponer que el dato de 31,2 t/mes, indicado en el EEIA-AI KCl, es el correcto. De esta forma, la generación estaría alrededor de 50 t/mes o 1,6 t/día que, con una densidad promedio de 127 kg/m³ (Medrano, 2021), representaría un volumen de 12,6 m³/día o una volqueta pequeña. Pese a ello, en ninguno de los estudios de impacto ambiental se especifican las ubicaciones, características detalladas ni medidas de seguridad de los sitios de disposición final.

Por último, como corolario de una poco prolija gestión de la disposición final de residuos domiciliarios y asimilables a domiciliarios, el EEIA-AI Li₂CO₃, en la "Tabla 2. Manejo, transporte y disposición de residuos sólidos-Apéndice III",

indica que los residuos no aprovechables, además de los textiles, “ropa de trabajo y guantes impregnados con hidrocarburos”, serían incinerados. Inclusive se incluyen los “desechables, plástico nylon, trapos de limpieza, envases de *shampoo*, envases de alimentos”. Es incorrecto que los materiales contaminados con hidrocarburos no se clasifiquen como peligrosos, más cuando la incineración de los materiales mencionados puede provocar dioxinas y otros contaminantes peligrosos.

La incineradora también se menciona en el EEIA-AI KCI. Por tanto, es incomprensible que la autoridad ambiental competente (AAC) acepte la posibilidad de la incineración de residuos sólidos, sin que se especifiquen de forma detallada sus características, la operación y el control ambiental.

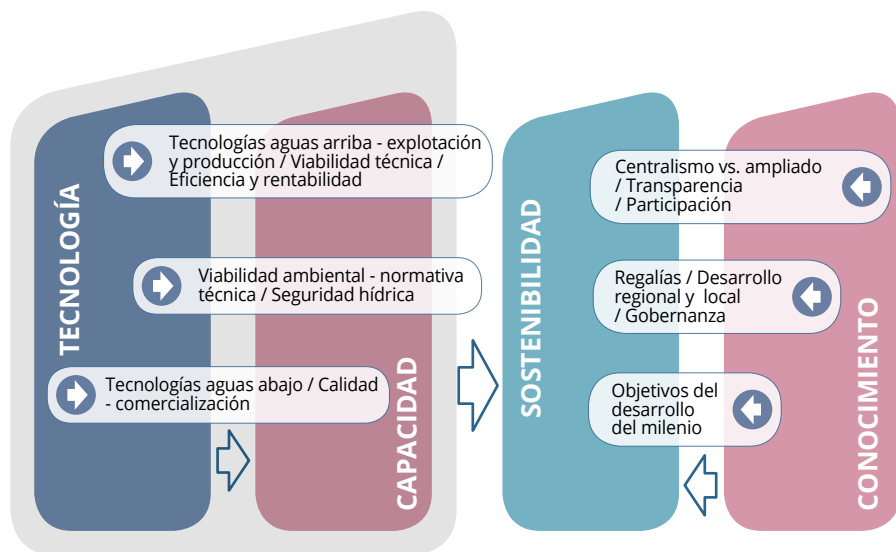
Reconocer y avanzar

La información presentada en los estudios de impacto ambiental muestra la vigencia de varios temas macro que fueron planteados por Olivera (2017), en una exhaustiva revisión del proyecto de industrialización del litio en Bolivia y las transformaciones del contexto mundial. La Figura 4 es un esquema que incluye algunos subtemas y cómo estos debieran orientarse al que se propone como central: la sostenibilidad.

Al existir un consenso mayoritario de respaldo al proyecto estatal y que tiene como meta y característica distintiva a la industrialización, la sostenibilidad se convierte en un tema fundamental para el gobierno central y también para los subnacionales, al tiempo que es motivo de observación permanente desde la sociedad civil, sus instituciones y organizaciones. Por ello, es preciso reconocer que, al tratarse de un proyecto que intenta poner en práctica los mandatos de la Constitución Política del Estado Plurinacional (2009), es fundamental que se apliquen los principios, valores, fines y funciones establecidos en sus artículos 8 y 9, y se respeten los derechos ambientales que reconoce, junto a todas las disposiciones relacionadas con la gestión de los recursos naturales.

Así, considerando los mandatos constitucionales y los aspectos evaluados en torno al proyecto de industrialización del litio, se sugiere registrar que varios aspectos clave que dificultan su desarrollo aún no fueron superados. Un

Figura 4 Tendencias temáticas en torno al proyecto de industrialización del litio.



problema es la falta de rigurosidad en la comunicación de la información y la ausencia de indicadores que permitan evaluar sus avances. Al respecto, se propone adoptar estándares internacionales para la presentación de memorias institucionales y lograr que todos los actores cuenten con información completa y comparable. Una alternativa es la adopción de los estándares GRI-Global Research International (2020) para la entrega de informes de sostenibilidad.

Los riesgos identificados por los estudios de evaluación de impacto ambiental con respecto de la generación de residuos y el alto consumo de recursos hídricos, además de observaciones a su viabilidad económica y técnica planteados desde hace varios años, instan a retomar de forma urgente las investigaciones de química básica para la sustitución del método de encalado y la mejora de la eficiencia o renovación de los métodos evaporíticos.

El EEIA-AI KCl, presentado en 2012 por la GNRE y COMIBOL, fue elaborado con una expectativa de producción de 700.000 t/año de cloru-

ro de potasio, pero en la etapa de construcción esta se redujo a la mitad, 350.000 t/año, sin que se dé una justificación técnica de dicho cambio (GNRE, 2016). De acuerdo con el artículo 64 del Reglamento General de Gestión Ambiental (RGGA, 1994), la licencia ambiental correspondiente debió ser revocada, porque se hizo una modificación significativa en el diseño original.

La GNRE y YLB realizaron, desde el inicio del proyecto, una intensa actividad de investigación hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica por tratarse de un conocimiento fundamental para la planificación de las operaciones y su sostenibilidad (GNRE, 2012). En 2016 se anunció la conclusión de la primera fase, además de su continuidad, pero los resultados no se publicaron en su totalidad (GNRE, 2016). Información clave acerca de la composición química de las salmueras del salar de Uyuni, a diferentes ubicaciones y profundidades, y de los procesos de transporte existentes en la cuenca no fue de acceso público ni siquiera para la elaboración del EEIA-AI Li_2CO_3 , presentado en 2020. Por ello, hubo deficiencias importantes en dicho documento.

No se puede seguir ocultando que los volúmenes de extracción de recursos hídricos como materia prima (salmueras) o como insumo (agua dulce) son significativos. Por tanto, es urgente contar con información completa acerca de los volúmenes disponibles para planificar una explotación sostenible desde el punto de vista técnico y ambiental. También es apremiante determinar el impacto de los procesos de extracción en los acuíferos circundantes y que son fuente de agua de consumo humano. La información del modelo hidrogeológico y de la dinámica de las aguas subterráneas debe ser de acceso público.

La existencia de subproyectos productivos y sus respectivas instalaciones, en la fase uno de investigación y pilotaje, en la dos de producción industrial básica y en la tres de producción de materiales catódicos y baterías, implicó el desarrollo de varios procesos de licenciamiento ambiental a través de estudios de evaluación de impacto ambiental y certificados de dispensación. Esta fragmentación de las evaluaciones puede ocultar impactos sinérgicos y acumulativos.

Por su complejidad y la magnitud de los posibles efectos de los impactos ambientales en un ecosistema de alta fragilidad, es fundamental el desarrollo de un proceso amplio, transparente e inclusivo de evaluación ambiental estratégica (EAE), previsto en el artículo 4 del RGGG (1994) y en el artículo 20 del Reglamento de Prevención y Control Ambiental (RPCA, 1994).

La primera fase de la *Evaluación ambiental estratégica en la región del sudoeste potosino* fue encargada a la consultora ECOVIANA SRL en 2011. Esta presentó un documento preliminar en el que propuso un plan de trabajo para iniciar actividades antes de noviembre de ese año. El informe está en la página web del Sistema Nacional de Información Ambiental (SNIA)¹, pero el proceso no continuó y no se explicaron las razones. El perjuicio mayor es la falta de un documento de EAE previo al desarrollo de las actividades de la GNRE y YLB que sirva de comparación. Sin embargo, ante la necesidad de una evaluación completa e integral de la estrategia y del proyecto, la EAE podría constituirse en el proceso adecuado para encontrar participativamente soluciones a los problemas ambientales identificados.

Las investigaciones hidrológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas desarrolladas desde 2013 proporcionaron información para la planificación de las operaciones. Pero, hasta el presente, no se tienen datos preliminares de las reservas minerales del salar de Uyuni para que puedan ser sometidas a un estudio de certificación internacional. Uyuni sigue siendo un paraíso de recursos sin reservas certificadas.

El aprovechamiento de otras sales, particularmente aquellas que son residuos de la producción de cloruro de potasio y carbonato de litio y que tienen potencial para convertirse en subproductos, es un objetivo de YLB (2018), pero no se cuenta con información sobre el desarrollo de los correspondientes subproyectos. Por tanto, el riesgo de que los residuos almacenados se conviertan en pasivos ambientales es latente.

Por último, es necesario transparentar y mejorar el control de la gestión de los residuos peligrosos que se entregan a otras empresas para su transporte, tratamiento y disposición final. Mientras que la gestión de residuos sólidos

1 La página web del Sistema Nacional de Información Ambiental es snia.mmaya.gob.bo/web/licenciamiento.php

domiciliarios requiere de mayor control en la etapa de disposición final y una auditoría ambiental al funcionamiento de la incineradora de residuos sólidos, cuya operación no está adecuadamente descrita ni evaluada en ninguno de los documentos oficiales del proyecto.

Estas primeras observaciones limitaron significativamente los avances para la resolución de varios de los temas propuestos en la Figura 4 y se constata la permanencia de una gestión caracterizada por un profundo “hermetismo”. Lamentablemente, también se confirman las hipótesis sugeridas por Olivera (2017) acerca de sus causas: i) resultados pobres y deficiente gestión y ii) poca transparencia con la información que genera especulación y desaprovecha las capacidades y posibilidades de impulsar un proyecto verdaderamente nacional.

Conclusiones

De la revisión de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral de las plantas modular e industrial de cloruro de potasio y de la planta industrial de carbonato de litio se determina una deficiente coordinación entre la GNRE, YLB y las consultoras contratadas para su elaboración. La principal señal de esta conclusión es que los resultados de las investigaciones, que declarativamente son soporte de la política ambiental del proyecto (GNRE, 2012), no fueron utilizados para la determinación y evaluación de los impactos ambientales. Es incomprensible que la autoridad ambiental competente apruebe procesos con significativos vacíos de información y precisamente sobre los factores ambientales de mayor vulnerabilidad, como es el caso del agua en el sudoeste de Potosí.

La falta de transparencia es absolutamente inaceptable en un proyecto estatal y en un campo de trabajo no tradicional, orientado a la industrialización de alta tecnología y alrededor de la cual existe un intenso desarrollo de innovación tecnológica y alta competitividad a nivel mundial. Ello limitó significativamente la oportuna resolución de aspectos centrales relacionados con la tecnología de los procesos de producción básica y la mitigación de los impactos ambientales, por ejemplo, el perfeccionamiento de métodos alternativos al proceso de encalado, la mejora de la eficiencia de los procesos

evaporíticos, los proyectos para el aprovechamiento de residuos industriales y adelantos en la eficiencia en las tasas de recuperación del litio.

Por último, tanto en los aspectos técnicos vinculados con la gestión ambiental como en otros de carácter operativo es importante establecer sistemas de alerta temprana ante el riesgo de sequías agudas y eventos extremos de lluvias. Por la intensa explotación de agua que implica la producción de litio, estas y otras medidas preventivas deben aplicarse en toda la región circundante al proyecto, como parte de un fuerte compromiso con el desarrollo regional y la protección de los derechos ambientales de sus habitantes.

Recomendaciones

Actualmente, el Proyecto Nacional de Industrialización del Litio está a punto de reiniciar actividades, luego del fallido intento de lograr una asociación que consolide la fase tres de la estrategia —industrialización y comercialización de productos con valor agregado—. El conflicto surgido entorno a la creación de la Empresa Mixta YLB ACISA, que derivó en su anulación, no ha sido otra cosa que el resultado del hermetismo con que se gestionó un plan estatal, cuya administración tiene más similitudes con el capitalismo de enclave que con un proyecto nacional.

Es urgente que se facilite el acceso a información completa y estandarizada a todos los actores interesados. Así, si se parte de la transparencia es preciso iniciar el debate para la construcción de un acuerdo nacional que dé soluciones a temas básicos, como la viabilidad y sostenibilidad tecnológica; la sostenibilidad ambiental, la mitigación de los impactos ambientales y la protección del agua dulce y libre de contaminación; la sostenibilidad económica, la eficiencia en la gestión financiera y la distribución justa de los ingresos, y la sostenibilidad social a través del fortalecimiento de las capacidades de las poblaciones locales, la facilitación de la participación y la articulación del proyecto con la planificación de desarrollo.

Dicho acuerdo nacional requiere una actitud moderada antes que triunfalista, ya que el proyecto es parte de una transformación mundial que no puede limitarse a la producción de productos básicos y transformados a partir de

los recursos del salar. Por el contrario, debe ampliar su perspectiva hacia el desarrollo de sistemas de reciclaje, economía circular, generación de energías renovables e inclusive trascender más allá de la “era del litio”.

Los procesos de investigación y adecuación tecnológica son largos, y en el caso boliviano también implica fortalecer el sistema educativo, particularmente en el sudoeste de Potosí, para propiciar una mayor participación de la población local en la ejecución del proyecto en todos sus ámbitos y no solo en funciones menores. Toda la industria del litio experimenta intensos procesos de innovación y actualización tecnológica, y si el objetivo es la creación de la llamada “soberanía científica y tecnológica con identidad propia” (AP, 2014), se requiere una actitud paciente y constante que mejore significativamente la inversión en educación y diversifique las experiencias colaborativas de investigación entre el Estado, la sociedad civil, otros países productores y la comunidad internacional.

Profundizar y transparentar la información hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica con participación de instancias especializadas, como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), el Servicio Geológico Minero (SERGEOMIN), el Servicio Geológico y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN), el Servicio Nacional de Áreas Protegidas (SERNAP) y la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico (APPS), con la premisa de la protección y uso sustentable de los recursos hídricos en el sudoeste de Potosí, podría convertirse inclusive en un modelo para el resto del país, particularmente significativo en el caso de la gestión del agua subterránea.

Pese a la promulgación de la Ley 755 de Gestión Integral de Residuos Sólidos, los avances son aún puntuales y los municipios pequeños enfrentan serias limitaciones en la etapa de la disposición final (ANF, 2018). El proyecto de industrialización del litio genera más de 1,6 t/día de residuos sólidos domiciliarios o 10% de la generación máxima en el municipio de Uyuni, el más poblado del sudoeste de Potosí (Bolivia, 2014). Así, en vez de operar una peligrosa incineradora podría ampliar su responsabilidad social y desarrollar un Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos Mancomunado, con los municipios circundantes al salar de Uyuni, para establecer un referente de aplicación de la mencionada norma.

El sugerido acuerdo nacional para el relanzamiento del hasta ahora fallido proyecto de industrialización del litio no puede demorar, ya que las asignaciones presupuestarias han sido significativas —más de 919 MUSD entre 2012 y 2018— y los resultados poco alentadores. Tampoco es posible demorar porque los avances tecnológicos, tanto en sistemas de producción alternativos de los productos básicos (Pagina Siete, 2019) como en el desarrollo de sustitutos para el litio (Gonzales y Catallopts, 2020), son vertiginosos y representan riesgos que pueden alterar los precios y la demanda. Por último, luego de más de 10 años, tal vez no sea posible parar la industria del litio en Bolivia, pero existen elementos para considerar tal situación y, de la misma forma, preguntar: ¿cuántos beneficios podrían generar la industria turística o la producción agropecuaria del sudoeste de Potosí si recibieran 900 MUSD de dólares para inversiones productivas?

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Banks, D., Markland, H., Smith, P. V., Mendez, C., Rodriguez, J., Huerta, A. & Saether, 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. *J. Geochemical Explor.* 84, 141-166. Citado por TERRAE, 2020, p. 11.
- Cómo es la imponente y polémica "Casa Grande del Pueblo", la nueva sede del gobierno de Bolivia construida por Evo Morales (2018, agosto 18). *BBC Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-45229290>
- Recogen 60 toneladas de basura en Uyuni (2014, enero 12). *Bolivia.com*. <https://www.bolivia.com/actualidad/nacionales/sdi/79047/recogen-60-toneladas-de-basura-en-uyuni>
- Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia. (7 de febrero de 2009).
- Corporación Minera de Bolivia. (2012). *Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental Analítico Integral (EELA-AI) del Proyecto Integral de la Salmuera en el Salar de Uyuni-Planta Modular y Planta Industrial de Cloruro de Potasio*. Consultora SIMBIOSIS Servicios Integrales en Medio Ambiente.
- Decreto Supremo 24176. (8 de diciembre de 1995). Reglamento General de Gestión Ambiental-RGGA. <https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-DS24176A.html>
- Decreto Supremo 24176 (8 de diciembre de 1995). Reglamento para la Prevención y Control Ambiental-RPCA. <https://www.lexivox.org/norms/BO-RE-DS24176B.html>
- Gaviria, S., Fierro, J., Quintero, E., Guío, C., Barreto, L. y A. S. Huerta. (2020). *Evaluación Independiente de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental-Analítico Integral (EELA-AI) del Proyecto Integral de la Salmuera del Salar de Uyuni-Planta Modular y Planta Industrial de Cloruro de Potasio y del Proyecto de Desarrollo Integral de las Salmueras del Salar de Uyuni-Planta Industrial de Carbonato de Litio*. [Texto no publicado]. Consultora GEOAMBIENTAL TERRAE, Bogotá, Colombia.
- Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos (GNRE)-COMIBOL. (2011). *Memoria 2011*.

- Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos-COMIBOL. (2012). *Memoria 2012*.
- Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos-COMIBOL. (2013). *Memoria 2013*
- Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos-COMIBOL. (2016). *Memoria 2016*.
- González, S. y Catallopts, J. (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030*. Comisión Chilena del Cobre Dirección de Estudios y Políticas Públicas. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Produccion%20y%20consumo%20de%20litio%20hacia%20e1%202030.pdf>
- Guzmán, J. (2014). *Un presente sin futuro. El proyecto de industrialización del litio en Bolivia*. Centro de Estudios para el Desarrollo Laboral y Agrario (CEDLA). <https://cedla.org/publicaciones/ieye/un-presente-sin-futuro/>
- Medrano, N. (2021). *Complejo de tratamiento de residuos sólidos en pequeñas poblaciones*. Programa de Doctorado de Ciencias Ambientales y Sostenibilidad-Universidad Técnica de Oruro. Programa SIB 2.0. S. I. B. - [Complejo de Tratamiento de Residuos sólidos en pequeñas poblaciones](#)
- Minera San Cristóbal-MSA. (2006). *Gestión de los recursos hídricos, fases de construcción y operación Toldos, Potosí*.
- Ministerio de Autonomías. (2014). *Agenda Patriótica 2025: ¿Quién hace qué?* http://vpc.planificacion.gob.bo/uploads/recursos/AGENDA_PATRIOTICA2025_QUIEN_HACE_QUE.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua-Dirección General de Medio Ambiente y Cambios Climáticos. (2011). *Elaboración de la Evaluación Ambiental Estratégica en la Región del Sudoeste Potosino (Primera Fase)-Informe Preliminar*. Consultora ECOVIANA SRL. <http://snia.mmaya.gob.bo/web/infoCT/InfoGral/SOPotosi/EAP:informePreliminar.pdf>
- Molina Carpio, J. (2007). *Agua y recurso hídrico en el sudoeste de Potosí. Foro Boliviano del Medio Ambiente (FOBOMADE) y Comisión para la Gestión Integral del Agua en Bolivia (CGLAB)*. <http://fobomade.org.bo/2007/03/01/sudoeste-de-potosi/>
- Obaya, M. (2019). *Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en el Estado Plurinacional de Bolivia*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44776/1/S1900479_es.pdf

- OIT/OMS/CE. (2018). Hoja de seguridad del sulfato de calcio semihidratado/ CAS: 26499-65-0. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo-INSST. https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=1217&p_version=2
- Olivera, M. (2017). *La industrialización del litio en Bolivia: un proyecto estatal y los retos de la gobernanza, el extractivismo histórico y el capital internacional*. UNESCO / CIDES. <http://www.cides.edu.bo/index.php/component/jdownloads/?task=download.send&id=112&catid=17&m=0&Itemid=101>
- Solo 23 de los 337 municipios del país cuentan con un relleno sanitario (2018, noviembre 12). *Página Siete*. <https://www.paginasiete.bo/sociedad/2018/11/12/solo-23-de-los-337-municipios-del-pais-cuentan-con-un-relleno-sanitario-199913.html>
- Zuleta: Bolivia no sabe explotar el litio ni consiguió patentes (2019, noviembre 4). *Página Siete*. <https://www.paginasiete.bo/economia/2019/11/4/zuleta-bolivia-no-sabe-explotar-el-litio-ni-consiguio-patentes-236336.html>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-PNUMA. (1987). *Metas y principios de la evaluación de impacto ambiental*. Decisión 14/15 del Concejo de Administración del PNUMA. ELGP9_SP.pdf (unep.org)
- Yacimientos de Litio Bolivianos Corporación. (2017). *Memoria 2017*.
- Yacimientos de Litio Bolivianos Corporación. (2018). *Memoria 2018*.
- Yacimientos de Litio Bolivianos. (2020). *Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental-Analítico Integral. Desarrollo Integral de las Salmueras del Salar de Uyuni-Planta Industrial de Carbonato de Litio Yacimientos del Litio Boliviano*. Consultora VIVENS Environmental Consulting SRL.
- Yacimientos de Litio Bolivianos Corporación. (2020a). *Presentación de la Rendición de Cuentas. Trinidad, 27 de febrero de 2020*. https://www.ylb.gob.bo/resources/rendicion_cuentas/rendicion_2017.pdf

Bolivia: de la industrialización del litio a la del titrio

Pablo Villegas

El relanzamiento del proyecto de industrialización del litio por el gobierno de Arce fue comentado por el presidente de Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), Marcelo Gonzales, así: “Hasta la fecha, la extracción de litio se la hace con tecnología de hace 40 años, lo cual es moroso porque demora entre 8 y 12 meses y se pierde el 40% de los componentes que son importantes en la industrialización” (Flores, 2021).

Esto significa que gastaron 1.000 MUSD en tecnología obsoleta cuando decían que estaban creando tecnología boliviana. En 2009, en el marco del Foro Mundial del Litio, el entonces director nacional de Minería, Freddy Beltran, dijo: “Bolivia se está convirtiendo [...] en el centro de la política, de la tecnología, de la discusión y de la investigación del litio [...] con tecnología boliviana, investigada por nuestros técnicos, con nuestros recursos” (Sandi, 20019). A casi 13 años de este encuentro, cabe hacerse la siguiente pregunta: ¿dónde están las patentes de la capital del desarrollo científico?

De una revisión global de patentes para baterías de litio NMC —usan una aleación compleja que contiene níquel, manganeso y óxido de cobalto— hasta 2017, se determinó que hay 4.070 patentes y 3.683 solicitudes pendientes¹. ¿Dónde están las patentes o las solicitudes bolivianas? La respuesta: están fuera del proyecto.

En 2018 la Universidad Técnica de Oruro, para contribuir con el proyecto, presentó públicamente las patentes de “Innovaciones tecnológicas para la industrialización de los recursos evaporíticos de Bolivia”, que reducirían el tiempo de producción de una tonelada de carbonato de litio de seis meses a seis horas y contribuirían a tener un producto con mayor valor y pureza.

Otro caso es la patente boliviana de técnicas de extracción de litio a partir de conos de evaporación del ingeniero Jaime Claros, de la Universidad Autónoma Tomás Frías de Potosí, y del profesor Wolfgang Voigt, de la Universidad Técnica de Freiberg de Alemania. Esta propuesta fue rechazada por YLB por las dificultades de llevarla a la práctica industrial. ¿A cambio de qué? Lo dijo el presidente de la empresa estatal: a cambio de una tecnología obsoleta.

¿Y cómo les fue en este campo a los vecinos del triángulo del litio? Una revisión rápida de las patentes argentinas muestra que, con menos discursos, en marzo de 2017, bajo la titularidad del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de Cuyo, se solicitó una patente internacional por el proceso de extracción y patentaron un método para la disolución de cobaltato de litio (LiCoO_2), contenido en las baterías ion-litio agotadas. Además, el doctor R. H. Milocco pidió una patente por el “Método y dispositivo para determinar el estado de carga y la capacidad de baterías recargables” (Fornillo, 2019). En Chile la Sociedad Química y Minera (SQM) formó un Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnologías del Litio que, con el tiempo, logró 16 patentes internacionales sobre procesos extractivos de este metal². Por tal razón, esta es una situación distinta a la boliviana.

1 Ver Know Made (2017).

2 Ver Know Made (2017).

Lo importante de la industrialización del litio

La importancia del proyecto de industrialización del litio fue muy grande para Bolivia. Ningún plan en su historia había prometido tanto en términos de desarrollo científico y tecnológico, lo cual hacía justicia a la larga lucha del pueblo boliviano por la industrialización. Visto así, la misión era demostrar que proyectos basados en la adaptación y desarrollo propio de ciencia y tecnología eran mejores que continuar con la extracción de materias primas. Por eso, el fracaso de la industrialización es un golpe a esa lucha. En el campo de la producción de materias primas tampoco hubo éxito, como demuestran las cifras y el hecho de que el gobierno terminó pidiendo ayuda al “imperio” para producir materias primas, cosa que la ley prohíbe.

Tabla 1 Exportaciones bolivianas de litio.

Fuente: INE (2018) y Ahora el Pueblo (2021)

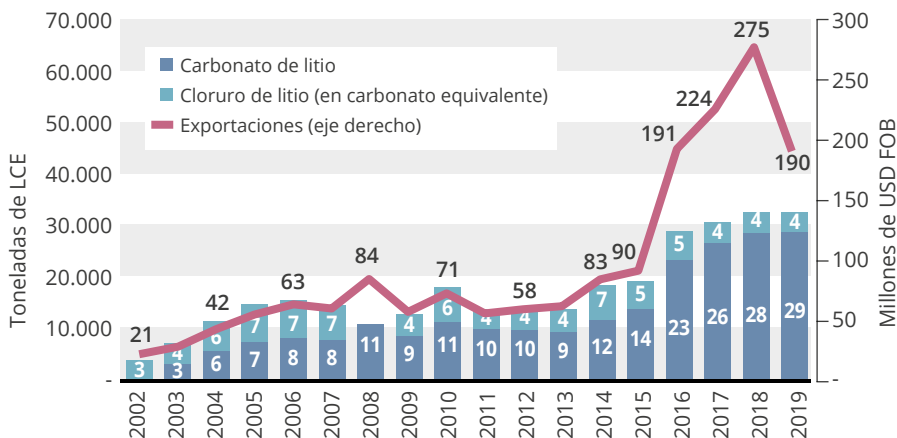
AÑO	2016	2017	2018	2021
Kg	19.326	45.324	30.215	704.000
Valor FOB USD	161.760	49.1792	561.140	34.800.000

Entre 2016 y 2021, las exportaciones bolivianas tuvieron un valor de 4.714.692 USD. En cambio, en Argentina las inversiones acumuladas en el sector del litio totalizaron en 1.118 MUSD. Entre 2016 y 2019, exportó un valor de 880 MUSD. Sobra decir que el viejo modelo de producción de materias primas de Argentina rindió más que el boliviano. Además, a junio de 2020, se reportó la creación de 1.474 empleos directos.

En Bolivia se dio mucha atención a la información respecto de las baterías. En septiembre de 2019, la empresa Quantum lanzó al mercado los primeros autos eléctricos fabricados en el país, y en la prensa aparecieron imágenes de alguien que llegó a la carrera a sacarse una selfi en uno de esos vehículos. Se trataba del entonces presidente Evo Morales, y el actual mandatario, Luis Arce, hizo exactamente lo mismo en el relanzamiento del

Figura 1 Valor de las exportaciones regionales de litio.

Fuente: Secretaría de Minería (2020)



proyecto del litio. En cuanto al primero, rápidamente se difundió la noticia de que los autos eran producto del proyecto de industrialización estatal del litio. Los fabricantes aclararon que no tenían relación alguna con el Estado. Luego, se publicó la noticia de que las baterías eran importadas de China. Para salir de papelón, en octubre de ese año, YLB se comprometió a proveer de baterías a Quantum, pero solo 20 por mes, o sea para 10 autos. Con eso quedaba claro el resultado del multimillonario proyecto. Imagínesse si una panadería industrial elaborara solo 20 panes al mes, ¿a qué costo saldría cada uno?

En fin, el proyecto sobrevivió a punta de publicidad y de titulares de prensa, como el de 2019 de El Deber: “Evo se reunirá con Macri para establecer precio del litio”. En ese entonces, el embajador de Argentina en Bolivia, Normando Álvarez García, dijo: “Tenemos el monopolio, entonces necesitamos sentarnos para establecer los precios y que no sean otros terceros que nos pongan” (El Deber, 2019). Mientras Data Urgente (2019) tituló: “Evo Morales: Vamos a decidir el precio del litio para el mundo”.

¿Producir baterías de litio por el solo hecho de poseer el 3% de su valor?

Existe una larga experiencia de que países que tienen poca materia prima o ninguna controlan su industrialización, los mercados y las patentes. En cuanto a las baterías, el litio representa solo el 3% del valor de esta, es decir, que para aportar el 97% restante se necesita mucho más que solo materia prima, en este caso litio.

En ese contexto, las capacidades que tienen los países que no poseen materia prima, son fundamentalmente la científica y tecnológica, y cuando deben comprarla en el mercado tienen las posibilidades para hacer un buen contrato y de hacerlo respetar, no como el convenio con la ACI Systems, tampoco como el de Chile con Albemarle, que hizo fracasar el proyecto de litio barato con el fin de atraer transnacionales productoras de baterías para establecerse en ese país.

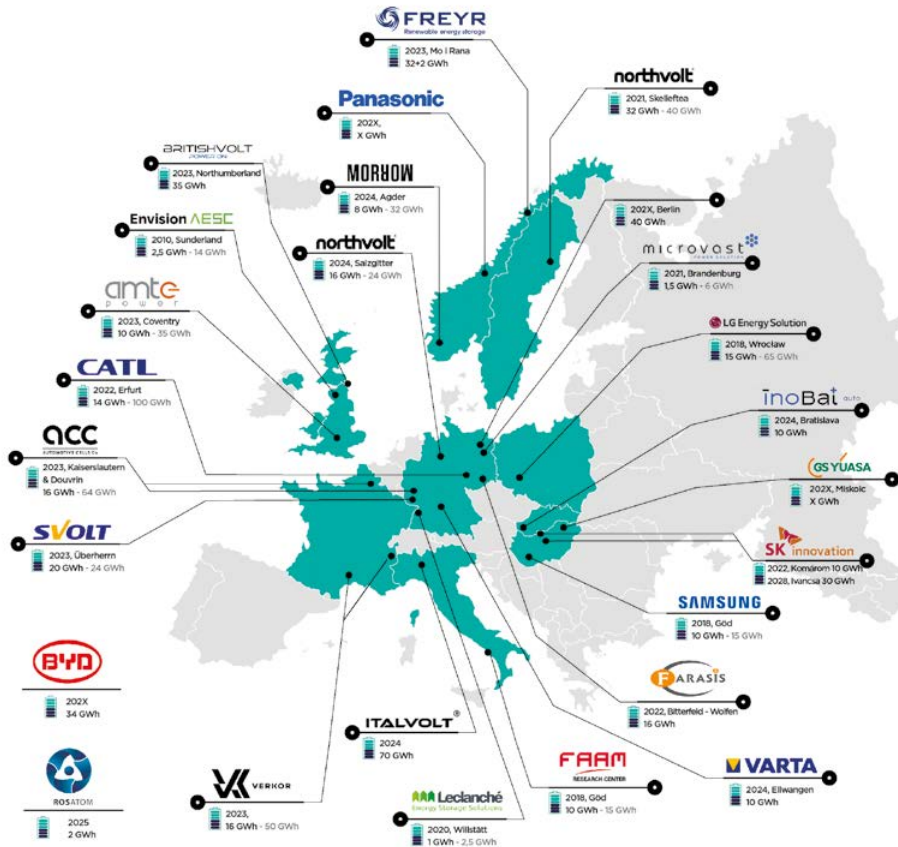
Fuera del triángulo del litio, las fábricas de baterías proliferan por el mundo y la actual disputa geopolítica entre occidente y Eurasia es un acicate de peso. China controla el 80% de la producción de baterías en el mundo, y Europa, desde 2018, se lanzó a la batalla para reducir su dependencia con este país mediante una serie de proyectos, muchos de los cuales se mencionan en la Figura 2. Estos planes responden solo al 50% de las necesidades previstas, lo que quiere decir que estos aumentarán. Eso es lo que pasa en el mundo real.

Mientras tanto en el triángulo del litio, donde todos juraban producir baterías y no volver a caer en la explotación de materias primas, pasaron los años hasta que finalmente hubo una novedad: en la actualidad están instalando la primera fábrica de baterías en Sudamérica, pero fuera del triángulo, en Brasil. Este país con sus 95.000 TM de reservas es un enano frente a los gigantes del triángulo del litio. Eso quiere decir que no cuenta con el 3% del valor de la batería, pero naturalmente puede comprarlo, como adquirió el gas de Bolivia, que nunca se industrializó y ahora se está acabando.

El proyecto mencionado es con Oxis Energy y no es para introducir un método de extracción del litio como en Bolivia, sino para fabricar baterías, y no cualquiera. Lo que sigue resalta la importancia de la innovación y la

Figura 2 Grandes fábricas de baterías en Europa.

Fuente: Ortiz, Sara, Careaga e Iñigo (2021)



eficiencia en el rubro del litio y la velocidad de los cambios. La empresa de vanguardia obtuvo 193 patentes y 94 están pendientes (Hall, 2020). Sus baterías de litio-azufre con electrolito semisólido requieren un menor costo de producción y una mayor densidad energética que las baterías de iones de litio actuales, lo que aumenta la seguridad y alarga su vida útil. Son hasta un 60% más ligeras y no contienen cobalto, manganeso, níquel o cobre, materiales que presentan serios problemas ambientales en la cadena de sumi-

nistro, lo que repercute en su precio final³. Bolivia sigue batallando con los métodos de extracción.

¿Cuál es el futuro? En 2017 el vicepresidente García Linera declaró que la inversión en litio “permitirá a Bolivia producir baterías de litio, cloruro de potasio para la agricultura y el combustible del siglo XXI, tritio, para generar energía eléctrica por fusión de átomos” (NODAL, 2017). Tal vez en estas palabras está el futuro: una vez que concluya el nuevo ciclo que se inicia con el relanzamiento de la industrialización del litio, es probable que empiece la etapa de industrialización del tritio. Si esto parece un absurdo, ¿no fue acaso un absurdo lo que pasó estos últimos 13 años?

3 Más densidad energética que el Li-ion. Las baterías semisólidas de litio-azufre de Oxis Energy están listas para las pruebas reales García (2021).

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Evo Morales: Vamos a decidir el precio del litio para el mundo (2019, abril 23). *Da-taurgente*. <https://wp.me/p7RYIL-3X2>.
- Evo se reunirá con Macri para establecer el precio del litio (2019, abril 16). *El Deber*. https://eldeber.com.bo/economia/evo-se-reunira-con-macri-para-establecer-precio-del-litio_139644
- Flores, Y. (2021, mayo 5). Más de 12 firmas tecnológicas se registraron a la convocatoria para extracción del litio. *La Razón*. <https://www.la-razon.com/economia/2021/05/05/mas-de-12-firmas-tecnologicas-se-registraron-a-la-convocatoria-para-extraccion-de-litio/>
- Fornillo, Bruno (Coord). (2019). *Litio en Sudamérica. Geopolítica, energía y territorios*. El Colectivo; CLACSO; IEALC-Instituto de Estudios de América Latina y el Caribe. Buenos Aires.
- García, G. (2021, mayo 3). Las baterías semisólidas de litio-azufre de Oxis Energy, listas para las pruebas reales. *Híbridos y Eléctricos*. <https://is.gd/epmYTy>
- Hall, M. (2020). Oxis Energy battery cells nearing aviation applications. <https://wp.me/p87GMW-q0N>
- Know Made. (2017). NMC Lithium-Ion Batteries Patent Landscape 2017. <https://www.knowmade.com/downloads/nmc-lithium-ion-batteries/>
- NODAL. (2017). Bolivia crea la empresa estatal Yacimientos del Litio Boliviano: no a las multinacionales. <https://www.nodal.am/?p=163794>
- Ortiz, S. & Careaga, I. (2021). Gigafactories: Europe's major commitment to economic recovery through the development of battery factories. CIC energiGUNE. <https://is.gd/Skfm6p>
- Sandi, R. (2009). Litio: Auguran que Bolivia se convertirá en la capital del desarrollo científico. <https://boliviasol.wordpress.com/2009/10/28/litio-auguran-que-bolivia-se-convertira-en-la-capital-del-desarrollo-cientifico/>

Litio en Chile: actualidad y perspectivas

Gonzalo Gutiérrez

Introducción

El litio es un recurso que tiene una importancia creciente en el mundo. Desde hace casi 10 años, la demanda, así como el precio, de este subió de forma sostenida, por lo que experimentó un crecimiento prácticamente exponencial desde 2015. La razón de ello reside en que hoy en día, además de sus usos tradicionales —grasas lubricantes, fritas, vidrios y cerámicas, entre otros—, es considerado un material energético fundamental. En efecto, gracias a sus singulares propiedades físico-químicas, se fabrican baterías con base en este metal, ya que pueden acumular grandes densidades de energía, además es un material muy liviano. El desarrollo de estas baterías, esenciales para almacenar la energía eléctrica, es un factor clave para el éxito de la transición energética que la grave crisis ambiental que se vive demanda.

Es imperativo transitar desde una matriz energética basada en los combustibles fósiles a una sostenida en energías renovables no convencionales, tales

como la solar fotovoltaica y la eólica. Estas tecnologías, como se sabe, son intermitentes, por lo cual es fundamental tener una forma eficiente, segura y barata de almacenar su energía. Las baterías de litio demostraron cumplir con estas exigencias. Ello transformó al litio en un elemento clave, y tensionó, por tanto, a los países que poseen reservas abundantes de este. Por ende, en tres países del Cono Sur, vecinos entre ellos, Argentina, Bolivia y Chile, se encuentran las mayores reservas de litio del mundo. Esto provocó una discusión científica, técnica, económica y política que abarca desde el qué hacer con él, su extracción, cómo industrializarlo, hasta discutir los daños medioambientales y los efectos que causa en las comunidades su explotación.

A continuación, se presentan algunos de los aspectos de esta discusión en Chile, sin ánimo de ser exhaustivo. Se explica por qué el litio es un elemento energético estratégico y se discute el concepto de material estratégico, para luego describir sus usos en la energía, así como las reservas que están disponibles en los salares del Cono Sur. Luego se expone la situación del litio en Chile mediante una brevísima recolección histórica y el análisis de su situación jurídica. El texto recoge elementos de la política diseñada por la Comisión Nacional de Litio y las perspectivas que se abren con la nueva Constitución que se está redactando, en el que el litio podría jugar un rol protagónico para un desarrollo científico, tecnológico, estratégico y soberano.

El litio, un elemento estratégico

La definición sobre el carácter estratégico o crítico de un material no es un asunto de carácter universal ni permanente, sino que depende de quién, con respecto a qué y cuándo lo define. Así, por ejemplo, en Estados Unidos el Departamento de Energía tiene un concepto claro acerca de la “criticalidad” de ciertos materiales para su futuro, y en función de eso diseñó una estrategia. En particular, definió al litio como un elemento *near critical* para el periodo 2015-2025 en lo que a almacenamiento de energía se refiere¹.

Por su parte, el panel conjunto de la American Physical Society y la Materials Research Society de Estados Unidos concluyó que hay siete elementos

1 Revisar, por ejemplo, U.S. Department of Energy (s/f).

críticos para este país con respecto a la energía: telurio (Te), germanio (Ge), platino (Pt), neodimio (Nd), litio (Li), renio (Re) y Terbio (Tb). Sobre el litio, subrayan que “lithium also has the potential for geopolitical risks, because the world’s known resources of easily extractable lithium are largely concentrated in three South American countries: Chile, Bolivia, and Argentina” [El litio también tiene el potencial de riesgos geopolíticos, porque los recursos conocidos del mundo de litio de fácil extracción se concentran en gran medida en tres países sudamericanos: Chile, Bolivia y Argentina] (APS-MRS, 2011).

De modo similar, la Unión Europea y Japón también avanzaron en definiciones sobre los materiales que consideran estratégicos para su desarrollo. De la lectura de esos reportes, queda claro que el carácter estratégico o crítico de un material depende de muchos factores: disponibilidad, geopolítica, importancia a futuro, reservas, entre varios otros (Eggert, 2011).

En el caso de Chile, no es difícil argumentar que el litio emerge efectivamente como un material estratégico, al menos por dos razones fundamentales. La primera es que el litio, además de sus usos tradicionales del siglo pasado, a partir del siglo XXI se ha convertido en un material energético esencial. La segunda se refiere a la relación con un factor geopolítico esencial: las mayores reservas de litio a nivel mundial se encuentran en tres países vecinos del Cono Sur: Argentina, Bolivia y Chile. Estos dos aspectos lo transforman en un elemento de importancia estratégica. De inicio se explicará dónde se encuentra el litio y quiénes lo explotan.

El litio en el mundo y en el Cono Sur

Si bien el litio es un recurso abundante en la naturaleza, se encuentra mayoritariamente en salmueras, luego en minerales de rocas tanto pegmatíticas (principalmente espodumeno) como sedimentarias (hectorita) y en otras fuentes como las salmueras geotermales o en campos petrolíferos. Argentina, Bolivia y Chile solo poseen recursos en salmueras; China y Estados Unidos, en salmueras y rocas, y el resto, como Australia, en rocas, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Fuentes donde se encuentra el litio en el mundo.

Fuente: Cochilco (2020), con base en diversas fuentes del mercado

TIPO	TIPOS DE DEPÓSITOS	PART. A NIVEL MUNDIAL	ESTADO NATURAL	UBICACIÓN MAYORES DEPÓSITOS
Pegmatitas	Espodumeno, petalitas, lepidolita, amblogonita y eucryptita	26%	Roca dura (a partir de magma cristalizado bajo la superficie terrestre)	Australia, EE. UU., RDC, Canadá
Salmueras	Continental (sales) geotermales y petroleros	66%	Salmueras (arena, agua y sales minerales)	Triángulo del litio (Chile, Argentina, Bolivia)
Rocas sedimentarias	Arcillas, toba volcánica, rocas evaporitas lacustres	8%	Rocas minerales de esmectita (arcilla) jadarita (evaporita lacustre)	EE. UU., México, Serbia (Jadar), Perú (Falchani)

Desde el punto de vista de la oferta, pocos países explotan el mineral. Su producción se concentra en Chile, Australia, Estados Unidos, China y Argentina. El salar de Atacama es la fuente más importante a nivel mundial por su contenido de litio y potasio, y por la tasa de evaporación (Ver Figura 1).

Actualmente, el método de extracción más competitivo es la evaporación solar, ya que no requiere mayores instalaciones de planta y utiliza la energía del sol. Conceptualmente es muy simple, pero muy intensivo en cuanto al uso de agua. La Figura 2 es un esquema de este proceso. Empieza con la extracción de salmuera por medio de cañerías de aproximadamente 10 cm de diámetro y se deposita en piscinas de decantación, del tamaño aproximado de una cancha de fútbol. A medida que avanza la salmuera por las piscinas se retiran diversos compuestos, hasta llegar a una salmuera rica en litio, de unos 5% a 6% de cloruro de litio (LiCl), que luego se extrae a través de solventes en plantas fuera del salar. El producto final es un polvo blanquecino, carbonato de litio (Li₂CO₃).

Figura 1 Mercado del litio.

Fuente: Cochilco (2020)

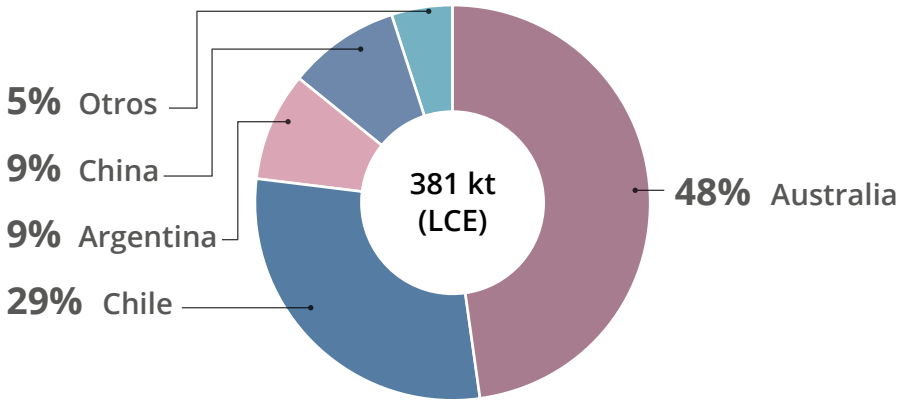
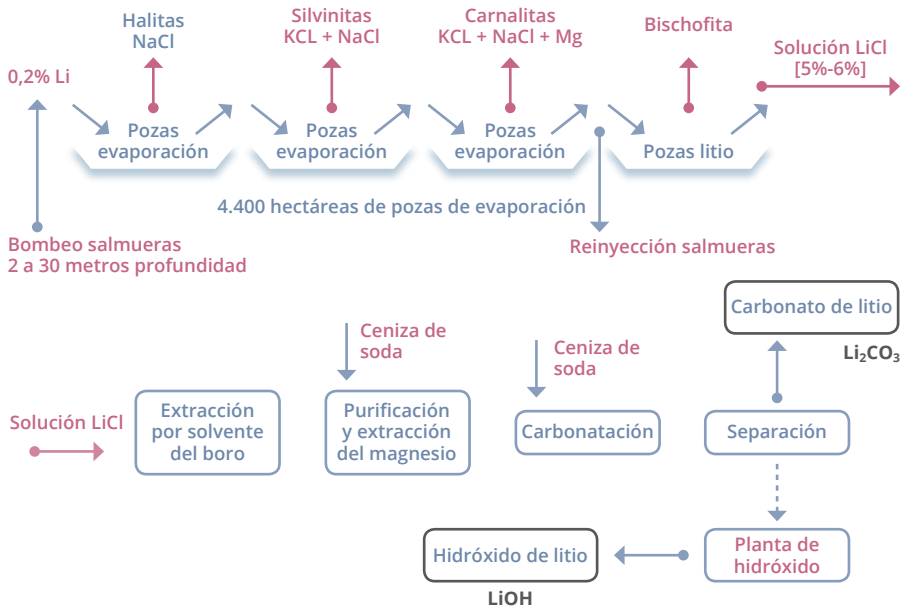


Figura 2 Proceso productivo típico del litio en salares.

Fuente: Con base en presentación de SQM, s/f.



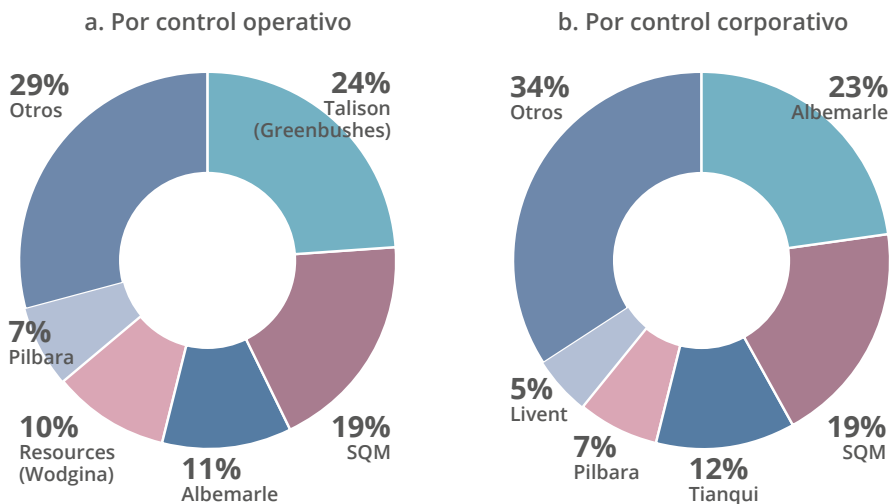
El mercado del litio está altamente concentrado, y en el Cono Sur es prácticamente un oligopolio. Se trata de uno más bien opaco, que no se transa en la bolsa, sino se vende de forma directa de empresa a empresa. En la participación de mercado de las diferentes empresas se distinguen dos mecanismos: por compañías a cargo de la operación y por la intervención de aquellas que controlan determinadas operaciones. Pero como sea, las dos más grandes firmas son la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) y Albermale (de Estados Unidos), ambas con operaciones en el salar de Atacama.

Luego están la empresa china Tianqi y otras, como se muestra en la Figura 3. En 2019 solo cinco concentraron dos tercios de la producción, entre ellas Albemarle y SQM. Cochilco (2020) señala:

Esta situación contrasta enormemente, por ejemplo, con el mercado del cobre, donde en el mismo año el mayor actor mundial, CODELCO, no contribuyó más del 10% de la producción mina agregada, y se debería considerar a más de 20 empresas para alcanzar una proporción equivalente a dos tercios de la producción mina.

Figura 3 Participación de diferentes empresas en el mercado, según el control operativo y corporativo.

Fuente: Cochilco (2020)



El litio como material energético

Hasta ahora, el litio participa como material energético de tres formas. La primera es el litio para la eficiencia energética: el ahorro de energía es la manera más básica de enfrentar la actual crisis energética. Una forma de ahorrar es construir medios de transporte más livianos. Las aleaciones de aluminio-litio recientemente manufacturadas juegan un papel clave en esto, y son ya una realidad, como la fábrica inaugurada por la empresa Alcoa en Indiana, Estados Unidos, en 2014. Estas aleaciones permiten tener materiales estructurales livianos y resistentes, cuyo uso en la industria aeronáutica y de transporte terrestre permitirán un ahorro considerable de energía².

La segunda es el litio para la energía de fusión nuclear: un uso futuro de este elemento es como combustible nuclear en los reactores de fusión. Si bien es cierto que aún no hay fusión nuclear controlada, existen dos grandes proyectos, uno de Europa y Japón, ITER, y otro norteamericano, NIF (Lawrence Livermore National Laboratory, s/f). que avanzan en esa dirección³. En ambos el litio jugará un papel fundamental tanto como combustible nuclear así como material estructural. En efecto, en los diseños actuales el combustible es una mezcla de deuterio-tritio, ambos isótopos del hidrógeno. Mientras el deuterio se encuentra en manera natural, el tritio debe producirse artificialmente. La forma de obtenerlo es a través del Li-6, que al ser bombardeado por neutrones transmuta en helio y tritio. Así, el litio en estado líquido tendría la doble misión de proveer el enfriamiento necesario para los reactores de fusión, y producir, al mismo tiempo, tritio.

Y la tercera forma es el litio para el almacenamiento de energía. El principal problema al que se enfrentan las nuevas formas de energía, llámese solar, eólica, geotermia o mareomotriz, es el transporte y almacenamiento de la energía cosechada. Hasta ahora, la manera más efectiva de transportar y almacenar la energía es mediante la electricidad. Ello implica tener baterías eficientes que lo permitan. Una de ellas son las con base en litio, cuya diversificación y masificación aumentan día a día. Otra forma de almacenar

2 Ver Alcoa Opens (2014).

3 Ver Iter (s/f).

energía es mediante sales fundidas, *molten salts*, donde las salmueras que están presentes en los salares son el elemento principal.

Las baterías con base en litio tuvieron un desarrollo explosivo, luego de que la empresa Sony las comercializara en 1991. Hoy en día se trata ya de una tecnología madura, con muchos proveedores, y cuyos usos van desde artefactos electrónicos pequeños, como relojes, tabletas y computadores, a baterías para automóviles, hasta el almacenamiento en redes eléctricas que pueden alimentar una ciudad de unos 30.000 habitantes, como lo probó, en 2017, la empresa Tesla en el sur de Australia⁴.

El sustento del éxito de esta batería de ion-litio está en su alta densidad de energía, debido al gran potencial electroquímico del litio —el mayor entre todos los elementos de la tabla periódica— y su bajo peso. No es menor el hecho de que a los químicos que contribuyeron de forma decisiva en este desarrollo científico-técnico les fuera otorgado en 2019 el Premio Nobel⁵. Los desarrollos actuales permiten bajar los costos y superar los problemas de seguridad —peligro de explotar por las altas temperaturas— que presentaron inicialmente⁶. Por esta razón, se ganó el mercado, y los expertos predicen que será así dentro de los próximos 15 a 20 años.

El litio como factor geopolítico

Como se explicó antes, las mayores reservas mundiales de litio están en tres países vecinos: Argentina, Bolivia y Chile. Esto se denomina el triángulo ABC del litio. Habida cuenta de la importancia que tiene el tema de la energía en el futuro —sobre lo que no se abundará aquí, pues existe suficiente evidencia al respecto— y el papel que juega el litio en su desarrollo, tener estas reservas es un activo inmenso, asimilable tal vez al hecho de acceder a los hidrocarburos a comienzos del siglo pasado.

Una política de Estado, con altura de miras y en beneficio de la nación, debe contemplar este aspecto. Debe pensarse en el diseño de acuerdos con

⁴ Ver Wikipedia (2021).

⁵ Ver The Nobel Prize (2019).

⁶ Ver Wikipedia (2021).

los países vecinos en el sentido de colaborar en la exploración, prospección y explotación del litio, así como maximizar la producción de valor agregado, hacia atrás y hacia adelante de la explotación. Esta acción puede hacerse con acuerdos de colaboración con Argentina y Bolivia. Ello no solo permitirá hacer más eficiente la industria del litio, sino que posibilitará un acercamiento también en temas científicos y tecnológicos. Más importante que todo lo anterior es constatar que todo esto redundará en mejores relaciones con las regiones vecinas, con el beneficio mutuo evidente. Este factor geopolítico que juega el litio no se puede soslayar en una política de Estado seria acerca de este mineral.

Litio en Chile

El interés mundial en el litio comenzó a mitad de 1950, en el marco de su uso para las bombas termonucleares o de “hidrógeno”, donde el tritio, un isótopo del hidrógeno que se obtiene a través del litio, es un componente fundamental. En Chile las exploraciones comenzaron en 1970 y fueron dirigidas por el Estado, que creó en CORFO (Corporación de Fomento, una especie de Ministerio de Desarrollo Industrial de Chile, fundado en 1939) el Comité de Sales Mixtas. Este exploró casi un tercio de los más de 60 salares que hay en Chile y determinó que en más de 10 existe litio de buena ley, pero que claramente el salar de Atacama, donde la alta concentración de litio y el que no haya sustancias contaminantes, permite que su explotación sea comercialmente muy conveniente.

Normativa sobre el litio: sustancia no concesible

Así, desde el punto de vista normativo, en 1976 fue incluido como sustancia de “interés nuclear” en la orgánica de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, y, en 1979, en la ley de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) fue declarado de “interés nacional”. Lo que se traduce en que se establece la reserva del Estado sobre el litio por su carácter estratégico y exige la autorización de la CCHEN para la explotación de este. En este contexto de creación de la CCHEN, mediante Ley 16319, se determinó que: “No podrán ser objeto de ninguna clase de actos jurídicos, sino cuando ellos

se ejecuten o celebren por la Comisión Chilena de Energía Nuclear, con esta o con su autorización previa”.

La Constitución de 1980 no incluyó explícitamente al litio como riqueza no concesible. Sin embargo, la Ley Orgánica Constitucional (1982), en cumplimiento al mandato constitucional, declaró al litio como sustancia no concesible, “sin perjuicio de las concesiones mineras válidamente constituidas con anterioridad a la correspondiente declaración de no concesibilidad o de importancia para la seguridad nacional”. Por último, en 1983, el Código de Minería reiteró lo ya dispuesto por la Ley Orgánica Constitucional al disponer que el litio no es susceptible de concesión minera. De esta forma, este elemento en Chile quedó con un estatus especial, similar al de los hidrocarburos.

Empresas que explotan el litio en el salar de Atacama

La historia de cómo llegó CORFO a arrendar sus pertenencias a dos empresas, SQM y Albemarle, es larga pero conocida. En resumen, en 1978, la Corporación de Fomento constituyó 32.768 pertenencias mineras en el salar de Atacama, que abarcaban una superficie total de 163.840 ha. En 1980 firmó un convenio básico con Foote Minerals para el desarrollo de un proyecto y creó la Sociedad Chilena del Litio Ltda., a la cual le transfirió 3.344 ha —Foote Minerals 55% y CORFO 45%—. Es decir, aportó a la sociedad 200.000 t de litio metálico equivalente.

En 1984 hizo una licitación pública internacional del Proyecto Sales Potásicas y Litio. En 1986 firmó un contrato para la realización de un proyecto entre CORFO, Amax Exploration y Molymet S. A. y se creó la Sociedad Minera Salar de Atacama Ltda. (MINSAL) —Amax 63,75%, CORFO 25% y Molymet 11,25%—. En 1988 la corporación vendió su 45% de participación en la Sociedad Chilena del Litio Ltda. a Foote Minerals en 15,2 MUSD y suscribió la Modificación del Convenio Básico CORFO-Foote.

En 1994 los socios acordaron el aumento de capital: SQMK 81,82% y CORFO 18,18% y transformaron a MINSAL en S. A. En 1995 CORFO vendió su participación accionaria a SQM en 7 MUSD, en la Bolsa de Comercio,

y el Contrato de Arrendamiento fue modificado. A partir de 1988 y luego en 1995, el Estado chileno mantuvo el contrato de arriendo con Rockwood Lithium y SMQ, respectivamente. Esta decisión, al ser las únicas faenas que explotan el mineral en Chile, dejó fraccionada la débil institucionalidad del país en relación con el litio. La propiedad le pertenece a CORFO (salar de Atacama), la autorización de cualquier acto jurídico le corresponde a la CCHEN, pero no existe ninguna entidad que genere conocimiento del salar que permita una planificada y cuidada explotación.

En Chile operan hoy en día dos de estas empresas: SQM, empresa chilena privatizada en dictadura y controlada por Julio Ponce Lerou, y Albermarle, transnacional de Estados Unidos, que adquirió Rockwood. Ambas sitúan sus labores en el salar de Atacama y concentran el 43% de la oferta del litio a nivel mundial. En este contexto de alta concentración económica es importante insistir que el litio es distinto a otros minerales, en cuanto a que no se transa en la bolsa de metales y su precio es el resultante de la negociación entre productor y consumidor, por lo que las condiciones de aprovechamiento e intercambio de una sustancia estratégica quedan al arbitrio de los empresarios que acaparan este mineral.

Las pertenencias de litio del salar de Atacama son las más importantes a nivel mundial. De los 14,3 millones de toneladas de litio estimadas como reserva, 7,5 millones se encuentran en este lugar. En cuanto a los términos de ventajas comparativas, los costos de elaboración de este mineral en Atacama son los más bajos del mundo por las condiciones de evaporación, producto del clima de la zona y la infraestructura ya instalada, gracias a la cercanía con las faenas de la gran minería del cobre.

Comisión Nacional del Litio

Estas características dan cuenta de que las pertenencias del Estado en el salar de Atacama, dada sus cualidades únicas y las potencialidades económicas que encierran, resultan estratégicas para el desarrollo del país, y, por tanto, la regulación y orientación de las actividades productivas ahí desarrolladas y su naturaleza deben ser cambiadas en función del valor único que revisten para el interés público.

Estas fueron las razones que consideró la presidenta Michelle Bachelet para convocar a un grupo de expertos y expertas de diferentes sensibilidades políticas, experiencias y profesiones a que diseñaran y propusieran una política del litio, que significara aprovechar este recurso natural en beneficio del interés general del país, con pleno respeto del medioambiente y las comunidades. Esta fue la Comisión Nacional del Litio, creada en junio de 2014, y que entregó su informe final, aprobado por unanimidad, en enero de 2015. Este documento, de 40 páginas principales y 60 de anexos, revisa la situación del litio en Chile, propone políticas a seguir en diferentes ámbitos y se constituye en lectura obligada para quien quiera conocerla (CNL, 2015).

Lo primero que hizo la comisión fue un diagnóstico. Este consignó que el litio fue abandonado por el Estado: había desconocimiento del comportamiento de los salares, de la situación de las comunidades y de su sustentabilidad. En particular, no existía ningún modelo hidrogeológico que pudiera indicar cuáles eran las cuotas de extracción permitidas: estas se habían dado a las empresas sin conocimiento científico-técnico alguno. Junto a esto, había una completa falta de regulación y control, ausencia de política pública, sin captura de la renta y escasa generación de valor de parte de las empresas. O sea, una situación desastrosa.

La comisión enfatizó que los salares son ecosistemas dinámicos, frágiles, de gran complejidad, que además son el hogar de pueblos indígenas ancestrales y comunidades que viven alrededor de estos. Concluyó que para cualquier análisis sobre el litio hay que tomar todo el salar en su conjunto, y que, por tanto, más que una política del litio, debe haber una política de los salares.

También reafirmó su carácter estratégico, dado su alto potencial de uso en aplicaciones energéticas, y recomendó mantener el carácter no concesible del mineral, por el hecho de que el sistema de concesiones mineras vigente no se adapta a la particularidad y complejidad del aprovechamiento de los salares. Asimismo, sugirió elevar a rango constitucional la no concesibilidad del litio.

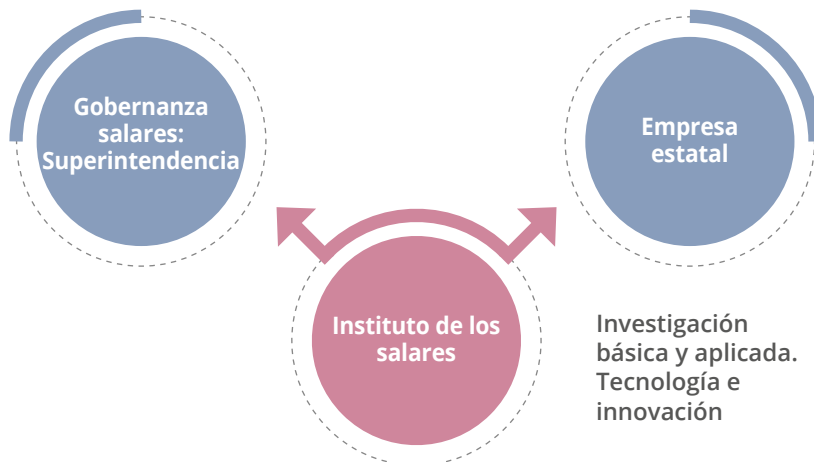
Respecto a la gobernanza de los salares y el litio, recomendó reforzar el rol del Estado como dueño auténtico de estos recursos, que define las condiciones y participa de modo principal en su explotación; maximiza y capta

su renta económica con una mirada de largo plazo, destinando parte de esta al desarrollo de encadenamientos científicos y productivos relacionados, y es impulsor y garante de asociaciones público-privadas que generen mayor valor agregado al país y mayor rentabilidad social en la explotación de los salares, en especial del litio, siempre resguardando la sustentabilidad ambiental y la sostenibilidad de los proyectos.

En definitiva, lo que planteó fue un esquema como el que se muestra en la Figura 4, en la que hay un ente regulador y fiscalizador de la situación de los salares; una empresa estatal, con o sin chimenea, que se encargue de la explotación racional de los salares, con pleno respeto al medioambiente y las comunidades, y un instituto de los salares, en coordinación con las universidades estatales y centros de investigación, con el objetivo de hacer desarrollos científicos y tecnológicos, y también asesorar a la Superintendencia y a la empresa con información basada en evidencias.

Por su parte, los comisionados consideran necesaria, casi unánimemente, la creación de una empresa controlada por el Estado que se dedique al aprovechamiento de los salares, en especial del litio. Respecto de la investigación y desarrollo, se adelantaron ciertas ideas.

Figura 4 Propuesta de esquema de gobierno de los salares y el litio.



Dada la diversidad y complejidad de las posibles aplicaciones presentes y futuras del litio, es preciso generar políticas para incentivar la investigación y desarrollo tecnológico de su forma de extracción y de sus múltiples usos. Entre las áreas propuestas de trabajo están el desarrollo de procesos productivos de carbonato de litio para la producción de baterías y sales acumuladoras de energía, tanto para la propulsión de vehículos como para la acumulación de energía en plantas de energías renovables, como solares, fotovoltaicas y eólicas; la generación de tritio para aplicaciones de energía nuclear; las aleaciones litio-aluminio y litio-magnesio para la producción de materiales livianos de alta resistencia, y los usos en la industria farmacéutica y probables sinergias con la nanotecnología.

Estas acciones se plantearon en sinergia con las actividades productivas y de innovación de otros sectores de la economía y de la ciencia y la tecnología para que permitan efectivamente aprovechar un recurso natural y fortalecer el desarrollo de largo plazo, de tal modo que, cuando el recurso ya no esté disponible, se haya aprovechado en el progreso de la inteligencia de la gente, y de esa manera crear un verdadero desarrollo industrial soberano:

- Se propone generar y fortalecer un clúster sectorial ligado al litio, que posibilite el fortalecimiento de centros de investigación e innovación asociados a universidades y a la industria, así como asociaciones público-privadas para la explotación del litio, que permitirán generar conocimientos, tecnologías, investigación y desarrollo.
- Se propone diseñar, en conjunto con la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) y CORFO, programas de investigación y desarrollo necesarios para promover esas capacidades y conocimientos para enfrentar este desafío país, con criterios de largo plazo.

En definitiva, la Comisión Nacional del Litio planteó un camino sobre cómo usar un recurso natural para transformarlo en palanca del desarrollo. Lo que vino después es conocido: estalló un escándalo político. Se descubrió cómo la empresa SQM y su controlador, Julio Ponce Lerou, corrompieron la política en Chile, es decir, pagaron favores políticos y entregaron dinero a todo el espectro de partidos políticos, excepto al Partido Comunista y Frente Amplio, quienes fueron los únicos ajenos a esta red de corrupción. Este

hecho debilitó cualquier acción por el litio, y el asunto quedó congelado. Lo único que se hizo fue renegociar los contratos con las empresas SQM y Albemarle, en algunas partes mejorándolo.

Sin embargo, para Chile y su desarrollo, una nueva historia comenzó el 18 de octubre de 2019. En efecto, se desató una movilización social sin precedentes, una verdadera rebelión popular, que logró imponer una ansiada demanda: escribir una nueva Constitución. La esperanza es que allí se plantee, finalmente, la necesidad de la recuperación de los bienes comunes estratégicos como el cobre, el litio, las aguas, los bosques, y respecto de los salares y el litio se puedan implementar las recomendaciones de la Comisión Nacional del Litio.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

- Alcoa. (2014). Alcoa Opens Worlds Largest Aluminum-Lithium Aerospace Plant in Indiana. <https://news.alcoa.com/press-releases/press-release-details/2014/Alcoa-Opens-Worlds-Largest-Aluminum-Lithium-Aerospace-Plant-in-Indiana/default.aspx>
- American Physical Society and Materials Research Society. (2011). Securing materials for emerging technologies. A report by the aps panel on public affairs & the materials research society. Technical report.
- Cochilco. (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030* (3), p. 688. Ministerio de Minería, Chile.
- Comisión Nacional del Litio. (2015). *Litio; una fuente de energía, una oportunidad para Chile* (3), p. 688. Ministerio de Minería, Chile.
- Eggert, R. (2011). Minerals go critical. *Nature Chemistry*, 3, p. 688
- Iter. (s/f). Fuelling the fusion reaction. <https://www.iter.org/sci/FusionFuels>
- Lawrence Livermore National Laboratory. (s/f). <https://lasers.llnl.gov/>
- The Nobel Prize. (2019). Popular information. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/popular-information/>
- U.S. Department of Energy. (s/f). <http://energy.gov/epa/initiatives/department-energy-s-criticalmaterials-strategy>
- Wikipedia. (2021). Hornsdale Power Reserve. https://en.wikipedia.org/wiki/Hornsdale_Power_Reserve
- Wikipedia. (2021). Lithium-ion battery. https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery

SOBRE LOS AUTORES

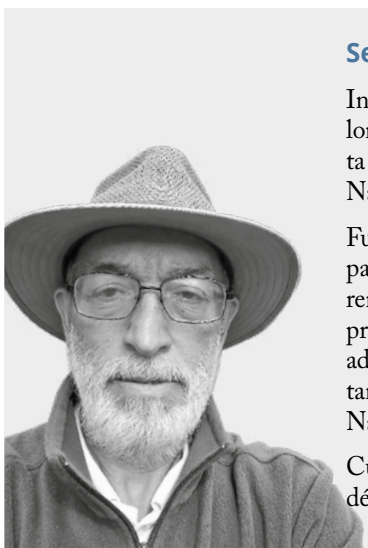


Marco Antonio Condoretty Vargas

Ingeniero químico de la Facultad Nacional de Ingeniería en la Universidad Técnica de Oruro. Se especializó en Recursos Evaporíticos en la Carrera de Ingeniería Química en la Facultad Nacional de Ingeniería e Industria del Litio en la Universidad de Kyoto-Japón.

Es docente de la Universidad Técnica de Oruro y ocupó varios puestos operativos en la Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos de la Corporación Minera de Bolivia y en Yacimientos de Litio Bolivianos, empresa en la que también desempeñó cargos ejecutivos.

Tiene amplia experiencia en investigación sobre minerales evaporíticos, además de producción intelectual.



Sergio Gaviria Melo

Ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia, con especialidad en Ciencias del Suelo. Cuenta con un doctorado en Suelos de la Universidad de Nancy en Francia.

Fue docente de varias universidades colombianas y participó de investigaciones científicas que son referencia en los estudios ambientales colombianos. Es profesor retirado y participó en consultorías y estudios, además dirigió unidades de investigación de importantes instituciones académicas, como la Universidad Nacional de Colombia.

Cuenta con una amplia producción intelectual y académica, que es de referencia regional.

Pablo Villegas Nava

Tiene estudios de antropología en la Universidad Mayor de San Andrés y salud pública en MSC, Universidad de Malmö.

Autor, entre otras obras, de *Geopolítica de las carreteras y el saqueo de los recursos naturales* (CEDIB, 2013), coautor del libro *Derechos indígenas y ambientales ante el extractivismo en Bolivia* (La Libre, 2019).

Actualmente, es investigador del Centro de Documentación e Información Bolivia (CEDIB) en políticas de recursos naturales con especialidad en geopolítica, extractivismo y pueblos indígenas.



Gonzalo Mondaca G.

Ingeniero ambiental con experiencia en gestión integral de residuos sólidos y gestión del agua. Se ha especializado en la gestión de actores y el impulso de procesos participativos de gestión de cuencas y acciones de adaptación frente al cambio climático.

Actualmente, es investigador del Centro de Documentación e Información Bolivia (CEDIB) en recursos naturales y derechos indígenas.





Gonzalo Gutiérrez

Doctor en Física y académico de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. Su área de trabajo es la ciencia de los materiales, mecánica estadística y energía.

Fue presidente de la Comisión Chilena de Energía Nuclear y miembro del Consejo Consultivo del Ministerio del Medio Ambiente en representación de la Central Unitaria de Trabajadores. También fue presidente de la Sociedad Chilena de Física y formó parte de la Comisión Nacional del Litio, convocada por la mandataria Michelle Bachelet, de 2014 a 2015.





Centro de Documentación e Información Bolivia

El Centro de Documentación en Información Bolivia – CEDIB es una institución que desde hace más de cincuenta años se dedica al resguardo de la memoria histórica, así como a la investigación y análisis crítico. Protagonizamos la construcción y la transformación estructural democrática, en función del bien común del país y la defensa y promoción de los derechos humanos y de la naturaleza.

Búscanos en:

-  cedibav
-  Cedib
-  cedibolivia
-  @cedib_com
-  Cedib Centro Documentación

Comunícate con nosotros:

-  difusion@cedib.org
-  +591-76988257



www.cedib.org



MÓDULO LITIO

¿SALIDA A LA CRISIS ECONÓMICA EN BOLIVIA?

Bolivia cuenta con el salar más extenso en cuanto a superficie a nivel mundial y con la mayor cantidad de recursos de litio de salmuera en el ámbito regional. Se trató de implementar una estrategia para la extracción y aprovechamiento del litio, cuyos resultados llevan más de 10 años sin rendir frutos. A pesar de estas contravenciones, la presión y tensión sobre los ecosistemas del salar siguen latentes y vigentes, más aún en un momento de intersección de múltiples crisis, ligadas a aspectos económicos, energéticos y climáticos.

El curso *Crisis, energía e impactos ambientales. Fracking y litio: ¿salidas a la crisis económica en Bolivia?* se propuso abordar el tema energético a partir de estos escenarios de múltiples crisis, pero con la idea de incursionar y fortalecer, especialmente, la mirada a través de lo técnico y científico. Esta forma de tratar la problemática se constituyó en un gran esfuerzo del CEDIB y la colaboración de destacados profesionales, de primer nivel, del continente y una gran cantidad de personas que participaron en el curso. Esperamos que toda esta información ayude a consolidar un urgente debate sobre los recursos naturales y el ejercicio de los derechos.

ISBN: 978-9917-9966-1-3



Brot
für die Welt

50 jaar
milieudefensie

CEDIB
Centro de Documentación e Información Bolivia

la libre
PROYECTO
EDITORIAL