

An aerial photograph of a lithium mine, showing several large, rectangular processing buildings with yellow roofs. The buildings are arranged in a grid-like pattern, with roads and tracks connecting them. The entire image is overlaid with a semi-transparent cyan color, which makes the yellow roofs stand out. The background shows a mix of green vegetation and brownish terrain, suggesting a semi-arid environment.

La fuerza del litio

David Torres / Norman Toro

memoria
creativa

El libro *La fuerza del litio*, de los autores David Torres y Norman Toro, es un proyecto de la Vicepresidencia de Litio de SQM, liderada por Carlos Díaz, y de la Vicepresidencia de Servicios Corporativos de SQM, liderada por José Miguel Berguño.

Comité editorial SQM

María Ignacia López, Ivonne Toro

Concepto, producción y edición

Equipo Memoria Creativa

www.memoriacreativa.cl

Dirección de arte: Camila Berger

Fotografía: Alejandro Araya

Diseño: Carolina Jarpa

Diagramas: Matías Karmelic

Registro de propiedad intelectual N° 2023-A-10487

ISBN N° 978-956-416-471-7

<https://doi.org/10.61303/978-956-416-471-7>

Impresión

Octubre de 2023

La fuerza del litio

David Torres / Norman Toro



Soluciones
para el
desarrollo
humano

unap

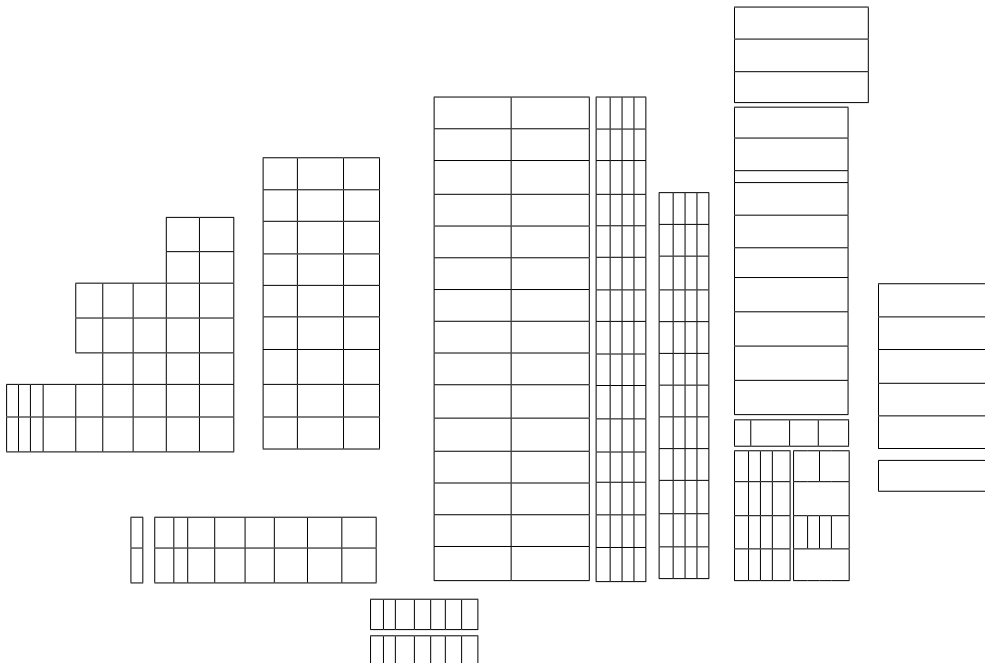
UNIVERSIDAD ARTURO PRAT
DEL ESTADO DE CHILE

CONOCIMIENTO Y TERRITORIO

Presentación	08
Carlos Díaz, vicepresidente ejecutivo litio SQM	
Los autores	10
Agradecimientos	
Introducción	12
Lithos, el descubrimiento del litio	
Cronología de SQM en la industria del litio	
Capítulo 1	20
El hallazgo de un yacimiento sin igual en el Salar de Atacama	
Los sistemas productivos de SQM Salar Parte I y II	
Capítulo 2	58
El primer gran salto de la exploración y la hidrogeología	
Los sistemas productivos de SQM Salar Parte III, IV y V	
Capítulo 3	88
La revolución tecnológica de las baterías de litio	
Aplicaciones industriales del litio	
Capítulo 4	114
El casi inalcanzable estándar chino para la electromovilidad	
La ciencia de las baterías de litio	
Capítulo 5	160
Resurgir gracias a la innovación propia	
Mercado del litio	
Capítulo 6	216
La hidrogeología única del Salar de Atacama	
Un depósito de litio único en el mundo	
Capítulo 7	258
Litio sustentable	
El mundo después del litio	
Recuperación de litio desde baterías	
Capítulo 8	316
Investigaciones pioneras en torno al futuro del litio	
La minería del litio en roca	
Capítulo 9	362
La conquista del vertiginoso mercado de la electromovilidad	
El mercado de las baterías de litio y sus metales	
Referencias bibliográficas	390
Agradecimientos	408

POZAS DE EVAPORACIÓN SOLAR SQM SALAR

Lugar : Salar de Atacama
Región : Antofagasta
Latitud : 23°32'27.90'' S
Longitud : 68°22'.32.40'' O
Altitud : 2305 m
Número de pozas : 370
Superficie total : 47 millones de m²
de pozas





PRESENTACIÓN

por **Carlos Díaz**

Vicepresidente ejecutivo litio SQM

Bajo la dura e imponente costra salina del Salar de Atacama, en un paisaje donde el cielo rara vez se nubla y el sol luce esplendoroso, podemos encontrar en una concentración inusualmente alta el primer metal de la tabla periódica, el más liviano y el menos denso del planeta: el litio.

Chile posee en el Salar una de las mayores reservas del mundo de este valioso mineral que por sus propiedades es un excelente conductor de electricidad, con características únicas para ser utilizado en el almacenamiento de energía. Por ello el litio se ha transformado en esencial para la electromovilidad, lo que facilita la utilización de energías renovables y favorece la reducción de emisiones de carbono.

Las salmueras de alta concentración en litio y otros minerales, le dan una oportunidad al país de estar presente en este negocio de forma competitiva. SQM ha conseguido que esa posibilidad se transforme en algo concreto y ha posicionado a Chile como un país líder en esta industria.

SQM ingresó el año 1993 al proyecto del Salar de Atacama luego de que una empresa minera de Estados Unidos y una chilena vendieran su participación en un contrato con la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo). Desde ese minuto, la compañía asumió riesgos y elaboró un riguroso método de trabajo para el desarrollo con éxito de lo que era hasta ese entonces una industria incipiente en el mundo.

Ha sido un camino largo, con importantes dificultades en un inicio. Durante más de 25 años, SQM ha invertido en innovación y tecnología para la aplicación de modelos propios con la capacidad de desarrollar tecnolo-

gías, aumentar rendimientos y crecer para satisfacer de forma óptima y sostenible la demanda en aumento en el mundo.

Como es sabido, el uso intensivo del litio, principalmente en almacenamiento de energía, ha sido estimulado solo en los últimos años. Al ser una industria joven, existe poca literatura e investigación al respecto. El gran trabajo de los ingenieros químicos David Torres y Norman Toro, autores de este libro, viene a llenar parte de este vacío de información con necesarios y exhaustivos datos sobre las propiedades, descubrimientos, características, tecnologías de producción, mercados y aplicaciones del litio. David Torres estuvo a cargo de un innovador proyecto para reconvertir las antiguas plantas de cloruro de potasio en SQM Salar y extraer sulfato de litio a partir de sales de carnalitas que antes se acumulaban como descartes. Recientemente asumió un nuevo desafío en Australia como parte del equipo de SQM que producirá litio a partir de espodumeno. Norman Toro es académico de la Universidad Católica del Norte y director de Investigación e Innovación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Arturo Prat.

Ambos autores aspiran a que esta publicación sea un material de referencia para universidades, centros de investigación y de innovación, escuelas de ingeniería y sobre todo para los estudiantes, porque cuando ellos fueron alumnos universitarios había muy poco material bibliográfico o cursos dedicados al litio. Es el aporte que David Torres y Norman Toro se propusieron hacer a partir de su vasta experiencia tanto en el ámbito de investigación aplicada a la industria como en el académico.

El presente material contiene, además, la historia nunca contada de la producción del litio por SQM, gracias a la investigación de Memoria Creativa. Este libro por primera vez abre al público todo el aprendizaje, dificultad e innovación de la producción de litio en Chile, experimentada por una de las mayores empresas productoras de litio a nivel mundial. Preserva así la memoria de los procesos y de las ideas creadas por equipos de profesionales, investigadores y trabajadores chilenos, cuyo ingenio colectivo continúa renovándose día a día para adelantarse a la cambiante y frenética industria mundial del litio.

Los autores



NORMAN TORO es ingeniero civil metalúrgico de la Universidad Católica del Norte, magíster en ingeniería industrial en la misma casa de estudios, doctor en tecnología y modelización en ingeniería civil, minería y ambiental de la Universidad Politécnica de Cartagena, España. Es académico de la Universidad Arturo Prat y se desempeña como director de Investigación e Innovación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Es editor invitado en las revistas internacionales *Metals*, *Materials*, *Minerals*, *Processes* y *Polymers* y trabaja en diversos proyectos en el área científico-social.



DAVID TORRES es ingeniero civil metalúrgico de la Universidad Católica del Norte, magíster en ciencias de la ingeniería en la misma casa de estudios y doctor en tecnología y modelización en ingeniería civil, minería y ambiental de la Universidad Politécnica de Cartagena, España. Se desempeñó como superintendente de plantas en SQM Salar de Atacama y recientemente ha asumido nuevos desafíos en la compañía Covalent Lithium –una empresa conjunta de SQM y Wesfarmers– para desarrollar y operar el proyecto de litio Mount Holland, en Australia.

Agradecimientos

Primero que todo, agradecemos a nuestras familias por brindarnos cariño y confianza desde siempre y por apoyarnos en nuestra aspiración de ser profesionales. También queremos reconocer a nuestros amigos y colegas, quienes han hecho que este camino sea grato de recorrer y han aportado alegrías y buenos momentos que atesoramos.

Queremos dar un mensaje a nuestros colegas, estudiantes, a la comunidad en general... Muchas veces estudiar y trabajar es visto como una tarea u obligación para optar a retos laborales que permitan sueldos más altos. Y de esto nacen expresiones como “trabajo para vivir, no vivo para trabajar” o “en la mesa o en una junta no se habla de trabajo”. La lista –todos lo sabemos– es muy larga.

Y se nos olvida lo hermoso que es tener la gran oportunidad de aprender, de satisfacer la curiosidad, de ampliar nuestra forma de pensar, de educarnos para tratar mejor a nuestro prójimo, de hacer inventos que ayuden hoy y mañana, de superar barreras idiomáticas. Como profesores podemos decir que la oportunidad de enseñar y traspasar a otros nuestro conocimiento ha sido una experiencia marcadora.

Con este libro, queremos alentarlos a que vivan el mundo de la educación y del trabajo como una aventura; atesoren cada bello momento que ocurra durante el viaje, esfuércense mucho, incluso más allá de lo que les pida su profesor o su jefe. No lo hagan solo por dinero u obligación; háganlo por la felicidad de alcanzar la meta; por la satisfacción de saber que, por difícil que fuera, lo consiguieron, y que ese esfuerzo ayudará al prójimo.

Más que representar nuestro esfuerzo, este libro es un reflejo de nuestro amor a la ciencia y al trabajo y, sobre todo, es una pequeña muestra de nuestro gran anhelo de aportar e inspirar a nuestra comunidad.

Queremos dar gracias a Dios y a la vida por la oportunidad de presentar en *La fuerza del litio* nuestros conocimientos y nuestra experiencia, y los invitamos a leerlo, a aprender y a comentar.

LITHOS

El descubrimiento del litio



Johan Arfwedson,
descubridor del litio.

El litio fue descubierto en el año 1817 por el científico sueco de 25 años Johan August Arfwedson. Ocurrió por casualidad en el laboratorio privado del químico Jöns Jakob Berzelius, en Estocolmo, mientras Arfwedson analizaba una muestra de un mineral feltespatoide llamado petalita, de fórmula $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ encontrado en la costa de Suecia.

Arfwedson comprobó que la petalita contenía aluminio, silicio y oxígeno. Después de determinar la abundancia de cada uno de los elementos, se extrañó al constatar que solo estaba representada aproximadamente el 96% de la masa total de sus muestras. Pensando que este desbalance era debido a las pérdidas de agua escapando desde materiales solubles producto de la lixiviación, Arfwedson repitió el análisis usando otro método. En su segundo experimento obtuvo un sulfato de una sal desconocida. Luego de eliminar la posibilidad de que esto pudiera ser una sal de potasio o de magnesio, estimó que esta sustancia podría tratarse de una sal de sodio. No obstante, el desbalance persistía. El experimento fue repetido dos veces, entregando los mismos resultados. Concluyó entonces que se trataría de una sustancia desconocida para la época, probablemente alcalina.

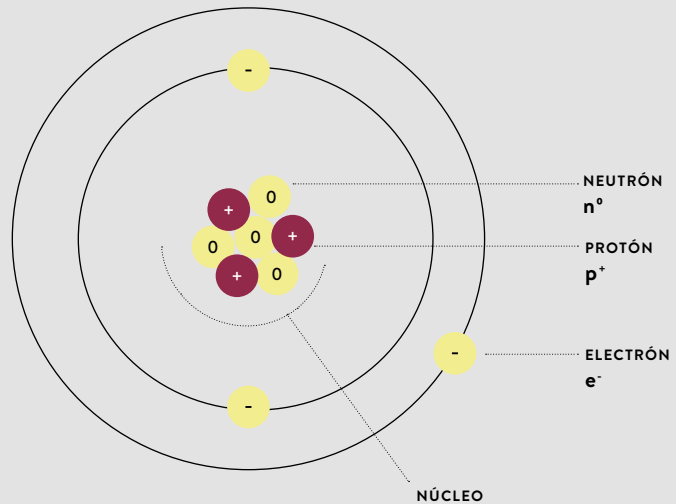
Johan Arfwedson bautizó el nuevo metal con el nombre de litio en honor a la palabra piedra –'lithos' en griego– que es al fin y al cabo donde encontró este metal alcalino. Mientras que los otros dos elementos comunes del grupo 1, sodio y potasio, se descubrieron a partir de fuentes vegetales. Berzelius describió el descubrimiento de Arfwedson en una carta al *Journal für Chemie und Physik* de fecha 27 de enero de 1818, bajo el título *Ein neues mineralisches Alkali und ein neues Metall*.

¿Qué es el litio?

El litio es el metal elemental más liviano y menos denso del planeta, con la mitad de la densidad del agua. Es el primer metal de la tabla periódica y forma parte de la familia de los metales alcalinos en el grupo 1, junto con el sodio, potasio, rubidio, cesio y francio. El núcleo de su átomo está constituido por tres protones y por tres o cuatro neutrones. El núcleo es orbitado por tres electrones en dos orbitales. El orbital interior contiene dos electrones y el orbital externo contiene solo un electrón que suele perder porque es un elemento químicamente muy activo. Por esta razón el litio no se encuentra en estado puro en la naturaleza, sino en salmueras y minerales muy estables, formando compuestos que contienen el catión Li^+ .

Átomo de litio

Estructura atómica de un átomo de litio



Propiedades físicas del litio

El litio presenta excelentes condiciones en la conducción de electricidad y de calor, con un bajo coeficiente de expansión térmica y un elevado potencial electroquímico. Esto último lo convierte en un ánodo adecuado para las baterías eléctricas.

Símbolo	Li
Número atómico	3
Peso atómico	6,94
Densidad a 25°C (g/cm ³)	0,534
Punto de fusión (°C)	180,54
Coefficiente de expansión térmica entre 273 y 368 K, K ⁻¹	56 x 10 ⁻⁶
Energía de ionización (eV)	5,37
Potencial de electrodo de la media celda (Li → Li ⁺ + e ⁻), V	-3,024
Forma cristalina	Cúbico centrado en el cuerpo

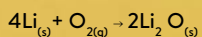
Propiedades químicas

El litio es un metal muy reactivo, pero considerablemente menos que los otros metales alcalinos del grupo 1 (sodio, potasio, rubidio, cesio y francio).

Cuando el litio se encuentra en su forma metálica, se trata de un metal blando, con un color blanco plateado, que se oxida muy rápidamente en presencia de aire o agua. En presencia de aire seco y a temperatura ambiente puede mantenerse brillante por varios días.

No obstante, en aire húmedo se forma rápidamente una capa gris que consiste principalmente en hidróxido de litio, óxido de litio y nitruro de litio. Para conservar el litio metálico se acostumbra a mantener en aceite mineral, evitando la reacción con la humedad del aire.

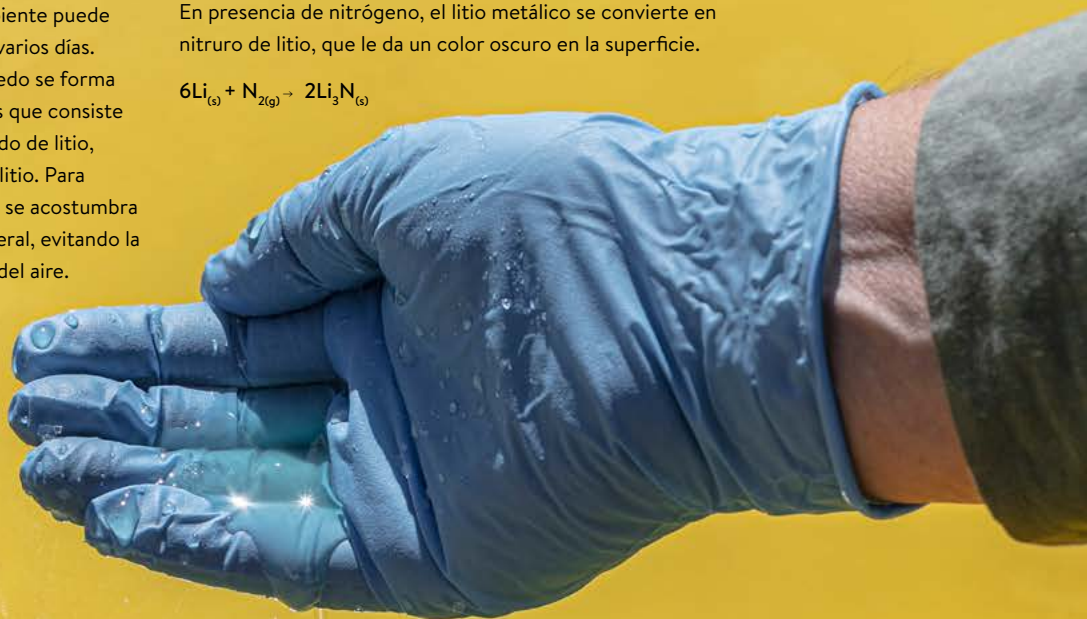
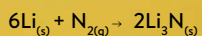
En contacto con oxígeno, el litio se oxida y produce Li_2O .



En una reacción exotérmica, el contacto del litio metálico con agua produce una base fuerte de hidróxido de litio e hidrógeno gas altamente inflamable.

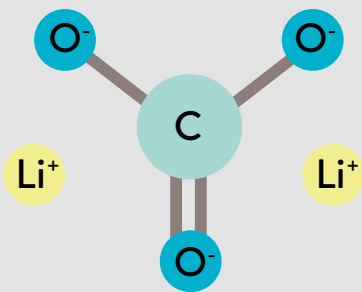


En presencia de nitrógeno, el litio metálico se convierte en nitruro de litio, que le da un color oscuro en la superficie.



Los dos principales compuestos de litio que produce y comercializa SQM son el carbonato de litio y el hidróxido de litio.

CARBONATO DE LITIO

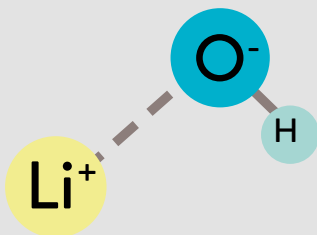


El carbonato de litio es un compuesto inorgánico de fórmula Li_2CO_3 . Exhibe una baja solubilidad en agua con relación a los carbonatos de metales alcalinos, así como de las otras sales de litio. La solubilidad disminuye con el aumento de la temperatura. No tiene propiedades higroscópicas y es estable cuando se expone a la atmósfera. De hecho, normalmente es el compuesto final que se encuentra cuando otros compuestos básicos de litio han sido expuestos a la atmósfera. A diferencia del carbonato de sodio, que forma al menos tres formas hidratadas, el carbonato de litio solo existe en forma anhidra.

Propiedades físicas del carbonato de litio

Fórmula	Li_2CO_3
Masa molecular (g/mol)	73,9
Apariencia	polvo blanco
Punto de fusión (°C)	618 - 723
Densidad (g/cm ³)	2,11
Solubilidad en agua a 25°C (g/L)	129

HIDRÓXIDO DE LITIO



El hidróxido de litio es un compuesto inorgánico que existe en forma hidratada, como hidróxido de litio monohidratado $\text{LiOH} \times \text{H}_2\text{O}$, así como en su forma anhidra de fórmula LiOH . Reacciona completamente tanto con ácidos débiles como con ácidos fuertes en soluciones acuosas. Es un material cristalino higroscópico blanco, soluble en agua (es el menos soluble entre los hidróxidos de metales alcalinos) y ligeramente soluble en etanol.

Propiedades físicas del hidróxido de litio

	Hidróxido de litio monohidratado	Hidróxido de litio anhidro
Fórmula	$\text{LiOH} \times \text{H}_2\text{O}$	LiOH
Masa molecular (g/mol)	41,96	23,95
Apariencia	sólido blanco cristalino	sólido blanco
Punto de fusión (°C)	462	462
Densidad (g/cm ³)	1,51	1,46
Solubilidad en agua a 20 °C (g/L)	216	128

El litio presenta excelentes condiciones en la conducción de electricidad y de calor, con un bajo coeficiente de expansión térmica y un elevado potencial electroquímico. Esto último lo convierte en un ánodo adecuado para las baterías eléctricas.

CRONOLOGÍA DE SQM EN LA INDUSTRIA DEL LITIO

La empresa norteamericana Amax y la chilena Molymet licitaron su participación en el consorcio denominado Minsal, para la explotación de litio y cloruro de potasio en el Salar de Atacama. El porcentaje licitado fue adquirido por SQM y la sociedad cambió de nombre a SQM Salar.

Se pone en marcha la primera planta de carbonato de litio de SQM en las instalaciones construidas en el Salar de El Carmen, con una capacidad de 15.000 toneladas por año.

El proceso productivo de carbonato de litio recibe la Certificación ISO 9001:2000.

Se aumenta la capacidad de producción de carbonato de litio en la Planta de Químicos de litio El Carmen a 32.000 toneladas por año.

1992

1993

1995

1996

1997

1998

2003

2004

Inicia su producción el primer proyecto de SQM en el Salar de Atacama: una planta de cloruro de potasio de 300.000 toneladas por año.

- SQM construye la primera planta de carbonato de litio en el Salar de El Carmen. En línea con el proceso de capitalización internacional necesario para financiar este proyecto, se lleva a cabo la segunda colocación de ADR en la bolsa de Nueva York. SQM fue la primera compañía chilena en emitir un segundo ADR.

Se construyen las plantas de sulfato de potasio y ácido bórico en el Salar de Atacama.

SQM empieza a comercializar litio. En menos de un año alcanza el 16% del mercado mundial.

2005

SQM inicia la producción en su nueva planta de hidróxido de litio, la primera de Latinoamérica, con la mayor capacidad productiva que existía hasta ese momento en el mundo, con 6.000 toneladas al año.

- Comienza el contrato de arrendamiento con Corfo de las pertenencias mineras en el Salar de Atacama, dando paso al proyecto para la producción de potasio y litio.

- Se realiza la primera colocación de un ADR (American Depositary Receipt) de SQM en el mercado internacional.

El proceso productivo de hidróxido de litio recibe la Certificación ISO 9001:2000.

• En la Planta de Químicos de litio El Carmen, se logra una capacidad de producción instalada de 48.000 toneladas anuales de carbonato de litio.

• En el Salar de Atacama se aumenta la producción de productos potásicos, alcanzando los dos millones de toneladas al año.

• SQM anuncia una ambiciosa expansión del plan estratégico del litio en Chile de 48.000 a 70.000 TM de carbonato de litio equivalente. También ingresa una Declaración de Impacto Ambiental, DIA, para próximas etapas de aumento de la producción de litio de 70.000 a 120.000 TM, y la tercera fase que agrega 60.000 TM adicionales de capacidad a las operaciones, alcanzando un total de 180.000 TM de LCE.

• Tianqi adquiere el 24% de la propiedad de SQM, por un valor cercano a los US\$ 4.070 millones, en la mayor operación en la historia de la Bolsa de Comercio de Santiago. Después de 15 años, Nutrien, la empresa de fertilizantes canadienses, dejó su participación en SQM para dar el paso a la estatal china.

• El 21 de septiembre de 2018 SQM cumplió 25 años de trayectoria en la Bolsa de Nueva York. Por esta razón, y con motivo del SQM Day, la compañía fue homenajeada en la NYSE. En la oportunidad, Patricio de Solminihac, en su calidad de gerente general, fue convidado a realizar el tradicional *Opening bell* con que se inicia la apertura de los mercados.

• SQM decide vender su participación en Caucharí, para concentrar sus esfuerzos en las operaciones en Chile, y lo que pronto serían nuevos desafíos en Australia. El total de su participación accionaria fue adquirido por Ganfeng Lithium Netherlands Co. por US\$ 87,5 millones. El acuerdo también estipula que Ganfeng pagará a SQM US\$ 50 millones de dólares adicionales si se cumplen los objetivos del proyecto para vender litio.

• Mediante un *joint venture* con la entonces Kidman Resources, SQM adquiere el 50% de los derechos del proyecto de litio Mt. Holland, ubicado en el estado de Western Australia. El *joint venture* desarrollará una mina, una planta concentradora de espodumeno, y una planta de refinación para procesar el concentrado proveniente de la mina. Posteriormente la compañía Wesfarmers Limited adquirió el 50% de la propiedad de Kidman en el proyecto Mt. Holland.

2007

Una nueva expansión lleva la capacidad productiva a 40.000 toneladas anuales.

2008

2012

• Aumenta la capacidad de producción de hidróxido de litio en Chile, desde 6.000 a 13.500 toneladas métricas anuales.

• SQM expande su negocio de litio a Argentina mediante un *joint venture* con la canadiense LAC, para desarrollar un proyecto de litio en Salar de Caucharí. Para obtener esta participación, SQM suscribió un aumento de capital por US\$ 25 millones a cambio del 50% de la propiedad de Minera Exar, empresa filial de LAC.

2016

2018

SQM exporta a China 14.000 toneladas de litio metálico. Un importante logro, considerando que el país asiático es el principal impulsor de la electromovilidad, con la fabricación de autos eléctricos y productos tecnológicos.

2019

2020

SQM firma un contrato de venta de 55.000 toneladas métricas de carbonato de litio e hidróxido de litio con la compañía LG Energy Solutions, uno de los principales productores de baterías del mundo. El plazo de este acuerdo se extiende a 2029 y se utilizará principalmente en la fabricación de baterías de vehículos eléctricos.

2021

SQM inicia construcción de nuevas plantas para aumentar su capacidad a 180.000 y 30.000 toneladas métricas de carbonato de litio e hidróxido de litio, respectivamente, para 2023.



La historia del litio en Chile, como muchos otros hallazgos mineros antiguos, partió de un descubrimiento casual. En 1962 la empresa minera norteamericana Anaconda, que en ese entonces era dueña de Chuquicamata, exploró el Salar de Atacama en búsqueda de agua dulce para sus faenas, a 80 kilómetros de distancia. El Salar de Atacama es el más grande de los salares chilenos, bordeado por la cordillera de Domeyko y la cordillera de los Andes. Está ubicado al suroeste de San Pedro de Atacama, a 2.300 metros de altura sobre el nivel del mar y a unos 200 kilómetros al este de Antofagasta. Hasta entonces esta inmensa planicie cubierta con una costra blanca y dentada de 85 kilómetros de largo y 50 kilómetros de ancho había sido históricamente habitada en sus bordes, pero pocos se aventuraban hasta su núcleo, porque es muy difícil circular sobre su filosa superficie que destroza sin piedad plantas de pies, zapatos y neumáticos.

Cuando los mineros de Anaconda perforaron la granítica costra del Salar, brotó algo que parecía agua, pero al observar con más atención advirtieron que se trataba de otra cosa. Era un líquido transparente y, sin embargo, denso, tan salado que su concentración de sales era siete veces superior a la del mar. Al analizar en un laboratorio el contenido químico de esta solución con sales minerales disueltas, también llamada salmuera, surgieron las primeras evidencias de altas concentraciones de litio, potasio, magnesio y boro en el Salar de Atacama.

Siete años más tarde, en 1969, los trabajos de prospección realizados por el Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile confirmaron que este Salar tenía el potencial de convertirse en el yacimiento más importante de litio en el mundo. La noticia despertó el interés chileno y mundial. En 1971 y 1972 el Instituto Corfo Norte construyó los primeros caminos de acceso e inició un programa de reconocimiento minero. Luego, en 1975 Corfo creó el Comité de Sales Mixtas para estudiar y cuantificar los recursos existentes en las salmueras del Salar y estudiar la factibilidad técnica y económica de su explotación. En ese trabajo el organismo estatal fue asesorado por la firma norteamericana Saline Processors Inc., con financiamiento de un crédito del Banco Mundial.

El estudio de la composición química de las salmueras almacenadas en los poros de la masa salina hasta una profundidad de 30 metros en una zona del núcleo del Salar de 1.400 kilómetros cuadrados, permitió estimar reservas inauditas hasta entonces para un yacimiento de litio y también de considerable riqueza en otros minerales:

Litio: 3,8 millones de toneladas.

Potasio: 53 millones de toneladas.

Magnesio: 26 millones de toneladas.

Ácido bórico: 11 millones de toneladas.

La concentración promedio de litio que encontraron los investigadores del Comité de Sales Mixtas de Corfo fue de 1,7 gr/lit (0,14% en peso), muy alta si se comparaba con los niveles de 0,03% y 0,005% de las salmueras de Silver Peak y Great Salt Lake, en Estados Unidos.

Dada su característica de cuenca cerrada, el Salar tenía la ventaja de recibir permanentemente aportes de ríos cercanos, como el San Pedro, y del agua de los deshielos cordilleranos, que arrastran sales que también contienen litio y otros minerales y escurren de manera subterránea en el Salar y que se han acumulado y concentrado durante millones de años en su interior. Por eso contiene salmueras tan ricas en litio y diferentes tipos de sales a pesar de que la zona tiene una pluviometría cercana a cero. Los estudios del Comité de Sales Mixtas estimaron en 1.000 toneladas la recarga anual en el caso del litio.

La cifra de casi cuatro millones de toneladas confirmó al Salar de Atacama como la mayor fuente potencial de litio en el mundo. Se trataba de un yacimiento sin parangón, considerando que en 1970 las reservas mundiales conocidas eran de 1.540.000 toneladas de litio provenientes de yacimientos pegmatíticos (espodumeno o litio de roca) y de 1.132.000 toneladas en salmueras. Es más, en 1979 Corfo aventuraba la siguiente proyección: “El aluminio, el plomo y el cobre verán agotadas sus reservas mucho antes que las del litio”.

Este es el aspecto amarillo y oleoso de la salmuera con un 6% de concentración de litio en la última etapa del proceso de evaporación solar. Esta salmuera está lista para ser procesada en las plantas de carbonato e hidróxido de litio, después de haber pasado algo más de un año por el circuito de pozas solares de SQM en el Salar de Atacama.



Hoy, que los salares en el mundo han sido más estudiados, se sabe que el Salar de Atacama es el tercero en tamaño a nivel mundial, luego de Uyuni en Bolivia y de Salinas Grandes en Argentina. Junto a una red de salares cercanos forma parte del “triángulo del litio” de Chile, Argentina y Bolivia. El salar de Uyuni, a solo 250 kilómetros de distancia, tiene recursos de litio más cuantiosos que los del Salar de Atacama, pero considerablemente más caros de extraer. La extraordinaria concentración y riqueza de litio en sus sales y su bajo costo de producción siguen distinguiendo al Salar de Atacama como un yacimiento único en la Tierra.

Este potencial tesoro de reservas de litio en el árido desierto chileno atrajo la atención de la empresa norteamericana Foote Minerals, una de las dos grandes productoras que dominaban la oferta mundial del litio y sus derivados y que además tenía experiencia en extracción de litio de salmueras, ya que producía 7.000 toneladas anuales de carbonato de litio a partir de salmueras concentradas en pozas de evaporación solar en Silver Peak, Nevada. Junto a la compañía Lithium Corporation of America –que producía 13.000 toneladas anuales de carbonato de litio a partir de espodumeno en Carolina del Norte– prácticamente se repartían más del 85% del mercado mundial. La única excepción a este monopolio era la Unión Soviética, que se calculaba que abastecía entre un 20% y un 25% por ciento de las necesidades de litio principalmente en países socialistas y en Japón. El consumo de litio durante los años 70 se centraba en las industrias del aluminio (50%), neumáticos (6%), productos cerámicos, aire acondicionado (25%) y purificador de agua en piscinas (5%), pero ya se hablaba del gran potencial futuro del litio para baterías y para energía nuclear.

Según datos de Corfo de esa época, Foote y Lithium America tenían yacimientos de explotación con reservas comprobadas de más de 500.000 toneladas de litio, poseían tecnología, comercialización y un alto nivel de control de mercado. “Solo otra compañía americana, de mayor envergadura, las podría desplazar del mercado”, auguraba en 1979 el informe de Corfo. Nadie imaginaba entonces que 20 años después SQM –una empresa chilena, novata en el negocio del litio– les arrebataría muy rápidamente la

posición dominante a las dos principales productoras del mercado mundial e invirtiendo menos de la mitad que sus competidoras.

Ya entonces la Sociedad Química y Minera o Soquimich (actual SQM) había puesto el ojo en el Salar de Atacama. Pero no por el litio, si no por sus generosas reservas de cloruro de potasio, que le permitiría darle un mayor valor nutricional a su tradicional salitre. Soquimich entonces aún era una empresa estatal y luchaba por mantener a flote a la alicaída industria salitrera chilena. Durante los años 70, SQM, en un programa conjunto con Corfo, estudió la factibilidad de una planta de cloruro de potasio de 200.000 toneladas al año en el Salar de Atacama. Tanto SQM como Corfo veían una potencial sinergia entre la explotación de los minerales del Salar de Atacama y la industria salitrera. El informe de Corfo *Proyecto Desarrollo del litio en Salar de Atacama Convenio Corfo - Foote*, de 1979, afirmaba que “los estudios realizados permiten afirmar que el Proyecto Salar de Atacama se perfila como el eje de un gran complejo químico inorgánico en el país, en combinación con la industria salitrera. Un ejemplo ilustra esta aseveración: el cloruro de potasio que se espera obtener en el Salar de Atacama permitirá producir nitrato de potasio, fertilizante con un mayor valor agregado que el nitrato de sodio, debido a su más alta concentración de nutrientes”.

Sin embargo, aunque la factibilidad del proyecto fue evaluada, el proyecto diseñado por SQM y Corfo no se realizó. El litio, el cloruro de potasio y otras sales seguirían durmiendo bajo la superficie del Salar por un tiempo. Faltaban recursos económicos y también técnicos. El diagnóstico reinante en esos años era que el país “actualmente carece de esta tecnología para la recuperación del litio, y en general son muy pocos los países que la poseen”, por tanto “el traspaso de tecnología por parte de empresas extranjeras” era un asunto “de extraordinaria importancia para el país”, como asevera el informe *El litio, mineral del futuro*, de 1981.

El 17 de enero de 1975 Corfo firmó un convenio con Foote Minerals para constituir una sociedad de responsabilidad limitada cuyo objetivo sería la exploración y explotación posterior de los recursos de litio y magnesio existentes en las salmueras del Salar de Atacama. En esta sociedad, llamada

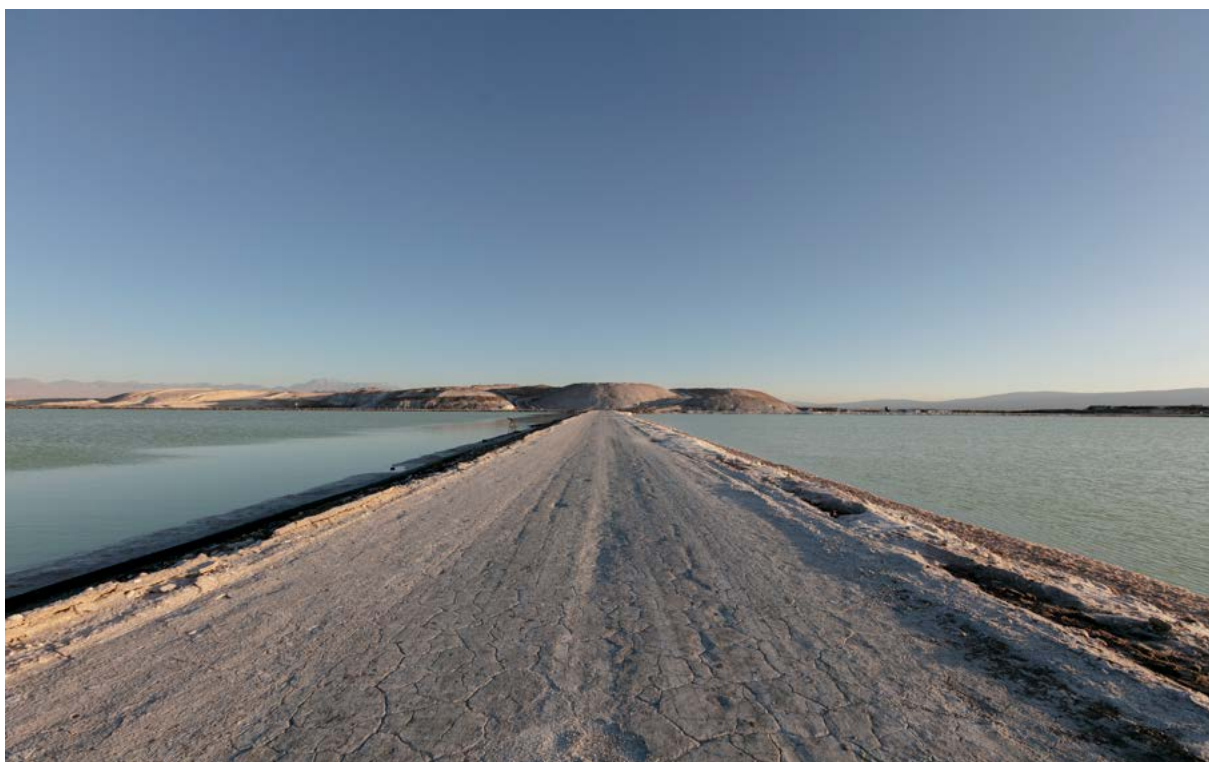
Compañía Chilena del Litio –en 1980 renombrada Sociedad Chilena del Litio–, Corfo tendría un 45% y Foote el 55% de participación.

Foote Minerals era la única empresa que explotaba litio de un depósito salino llamado Silver Peak, en Nevada, por tanto su experiencia y conocimiento tecnológico podían ser útiles en el Salar de Atacama. Si bien la concentración promedio de litio en el Salar de Atacama era cinco veces mayor que la de Silver Peak, sus salmueras también contenían una mayor concentración de impurezas, principalmente magnesio, que era necesario separar.

Según los términos del convenio, Foote se comprometió a proporcionar la tecnología mediante una suma inicial de 600.000 dólares para financiar los trabajos de desarrollo de un proceso comercial de recuperación de litio. El aporte de Corfo en los trabajos de exploración, mensura y estudios preliminares ejecutados a esa fecha, incluyendo la construcción de caminos de penetración al Salar y campamentos, se valorizó en un 45%.

Corfo desarrolló una tecnología de recuperación de sales potásicas y ácido bórico que se basaba en la utilización de energía solar para concentrar soluciones en pozas con fondos de arcillas impermeables, un material que era abundante en el Salar de Atacama. El mismo método fue utilizado por Foote en sus estudios previos para la extracción de litio y magnesio y también adoptó técnicas de extracción de litio utilizadas en las salmueras de Silver Peak para la construcción de las pozas.

El primer proyecto planteado por los socios Foote y Corfo fue instalar una planta de carbonato de litio de 5.000 toneladas anuales. El proyecto contemplaba el bombeo de las salmueras del Salar y su transporte mediante ductos a estanques de evaporación donde se procedería a una cristalización fraccionada de las distintas sales. El Salar de Atacama se caracteriza por una alta radiación solar y fuertes vientos secos durante el día, lo que facilitaba una alta tasa de evaporación. En los experimentos participaron ingenieros chilenos del Comité de Sales Mixtas de Corfo y norteamericanos de Foote. “Los diagramas de fase disponibles han sido de enorme utilidad, especialmente en el inicio del proceso de evaporación. Han servido como



Las pozas de evaporación solar, en las que se concentra y se rescata el litio y el potasio, cubren una superficie superior a 47 km², lo que representa un 0,5% de la superficie del Salar de Atacama. Las pozas son rectangulares, de 1,5 metros de profundidad y de variadas dimensiones, y se encuentran construidas sobre el Salar.



una herramienta útil de predicción preliminar. Las experiencias realizadas hasta la fecha en bateas metálicas y pequeñas pozas de arcilla recubiertas con plástico, han demostrado que la conducta de las salmueras del Salar concuerda con la teoría de que el litio y el magnesio alcanzan concentraciones de 7,5 y 65 g/L respectivamente”, concluía el informe del proyecto de Corfo y Foote de 1979.

El proceso de evaporación estudiado para ese proyecto consideraba las siguientes etapas: en las primeras pozas se separaba inicialmente el cloruro de sodio puro; en un segundo conjunto de pozas se cristalizaba silvinita (cloruros de sodio y potasio). Luego cristalizaban sucesivamente schoenita, leonita, kainita y carnalita.

Se estimó que una planta de carbonato de litio de 5.000 toneladas anuales de capacidad, con campamento e infraestructura, tendría en el Salar de Atacama un costo de entre 18 y 20 millones de dólares, incluida una pequeña planta de producción de magnesio grado refractario. También se hicieron estudios para una planta de 20.000 toneladas anuales de ácido bórico y una planta de cloruro de potasio de 200.000 toneladas anuales.

En el curso de las negociaciones para llegar a un acuerdo final se tomaron en cuenta aspectos de salvaguardia invocados por la Comisión Chilena de Energía Nuclear respecto al interés estratégico del litio debido a su potencial uso en reactores de fusión nuclear y al interés de las potencias mundiales en construir bombas termonucleares en el contexto de Guerra Fría. El Estado chileno siguió una línea parecida a la del gobierno de Estados Unidos respecto al litio, y el 22 de octubre de 1979 se promulgó el Decreto Ley 2.886 que declaraba al litio como un recurso del Estado. Fue declarado mineral estratégico, de importancia para la seguridad nacional y, por tanto, no concesible.

Después de cinco años de intensas negociaciones, en 1980 Corfo y Foote Minerals firmaron un convenio básico y crearon la Sociedad Chilena del Litio, para construir la primera planta de litio en el Salar de Atacama. Corfo, como dueña de 32.768 pertenencias mineras, inscritas a fs. 408, número 11 del Registro de Propiedad del Conservador de Minas de El Loa,

aportó a la sociedad el dominio de 3.344 pertenencias mineras en el sector sur del Salar y Foote aportó tecnología.

En 1984, la Sociedad Chilena del Litio inició la primera producción de carbonato de litio en Chile en la planta de 5.000 toneladas anuales, en base al sistema de evaporación solar estudiado por Corfo y Foote Minerals. Posteriormente, entre 1988 y 1989, Corfo vendió a Foote su 45% de participación, por lo que la empresa norteamericana quedó con el 100% de la propiedad de la Sociedad Chilena del Litio y sin que se le cobrara una *royalty*, como sí sería asignado a Amax y SQM algunos años después.

El proyecto Minsal

En 1983, Corfo llamó a un concurso público internacional para realizar un segundo proyecto de explotación de litio en la zona sur del Salar, sobre un área cinco veces mayor que la de la Sociedad Chilena del Litio. Aunque las reservas del Salar de Atacama le interesaban sobremanera a SQM, especialmente por el cloruro de potasio para dar un valor agregado a sus fertilizantes, la crisis financiera que acarrea de años anteriores hacía imposible realizar una inversión de esa envergadura. En esa época la empresa se encontraba en pleno proceso de privatización y de impostergable reducción de costos. La licitación finalmente se la adjudicó un consorcio formado por la compañía norteamericana Amax Exploration, con experiencia en plantas de potasio, y por la empresa metalúrgica chilena Molibdeno y Metales (Molybmet S.A.).

Corfo firmó un Contrato para Proyecto con Amax y Molybmet S.A. sobre 28.054 de las pertenencias mineras restantes pertenecientes a Corfo. De ellas, 16.384 fueron asignadas para desarrollo y 11.670 como área de resguardo, con prohibición de ser explotadas. Ambas empresas y Corfo crearon la Sociedad Minera Salar de Atacama Ltda. (Minsal Ltda.) con un 63,75% de participación de Amax, un 25% de Corfo y un 11,25% de Molybmet.

El proyecto Minsal buscaba, a partir de la extracción y concentración por medio de la evaporación solar de las salmueras del Salar, construir cuatro plantas químicas: una para producir cloruro de potasio, otra para

producir ácido bórico, otra planta para producir sulfato de potasio, una variedad de sales de sulfato y magnesio, y la cuarta para carbonato de litio.

El ingeniero químico norteamericano Jerome Lukes, experto en diseñar procesos de evaporación solar para la extracción de sales (especialmente sulfato de potasio) en Estados Unidos, Israel, Japón y Australia, fue contratado en 1987 como jefe del estudio del proyecto Minsal, junto a los ingenieros Jaime Cáceres y Felipe Vergara Edwards, que tenían la experiencia previa de estudios en el Salar de Atacama para el Comité de Sales Mixtas de Corfo. A ese equipo se unió el ingeniero químico Pedro Vargas, del departamento de Ingeniería y Química de la Universidad de Antofagasta. Esa fue la cabeza inicial del equipo de ingenieros, químicos y geólogos que entre 1987 y 1989 diseñaría los procesos y pruebas para la exploración y explotación de minerales del nuevo proyecto Minsal del Salar de Atacama.

Los primeros estudios a nivel de laboratorio y de planta piloto comenzaron en 1987, dirigidos por Jerome Lukes y financiados por el proyecto Minsal. Durante dos años el equipo de Minsal realizó pruebas en un laboratorio y en una planta piloto instalada en el departamento de Ingeniería y Química de la Universidad de Antofagasta. Estas consistieron principalmente en estudios de solubilidad para comprobar si se podía producir carbonato de litio, sulfato y cloruro de potasio a partir de las salmueras. El modelo, parecido al del vecino proyecto de Sociedad Chilena del Litio de Corfo y Foote, consistía en bombear la salmuera desde debajo de la superficie terrestre y depositarla en pozas de evaporación solar. A medida que los líquidos se evaporaran, la salmuera se iría concentrando y precipitarían distintas sales –como cloruro de potasio y sulfatos con presencia de potasio, cosechados como sales– hasta que en la etapa final quedaría la salmuera concentrada con un 6% de litio y que luego sería procesada en la planta de carbonato de litio.

En el laboratorio de la Universidad de Antofagasta se hicieron mediciones de presión de vapor, viscosidad, densidad, solubilidad y química de fases para localizar en qué etapas del circuito de pozas de evaporación la salmuera se va concentrando y determinar la ruta de cristalización de

El modelo del Proyecto Minsal consistía en bombear la salmuera desde debajo de la superficie terrestre y depositarla en pozas de evaporación solar. A medida que los líquidos se evaporaran, la salmuera se concentraría y precipitarían sus sales –como cloruro de potasio y sulfato de potasio– hasta que en la etapa final quedaría la salmuera concentrada con un 6% de litio, que luego sería procesada en la planta de carbonato de litio.

las distintas sales. Es decir, cuándo se deben retirar las sales que se van acumulando al fondo y cuándo se debe llevar la salmuera a otra poza para que cristalicen otras sales, en lo que se conoce como una cristalización fraccionada, es decir, por etapas. Fue necesario crear en la universidad un centro de análisis químico dedicado exclusivamente a analizar las miles de muestras de salmueras extraídas de las pozas de evaporación solar piloto que construyó Corfo en el Salar durante los estudios previos.

Estos estudios básicos a nivel de laboratorio sentaron las bases para diseñar el modelo de evaporación solar y de las plantas de carbonato de litio, sulfato y cloruro de potasio. Después de estas pruebas químicas se hizo el estudio económico para demostrar la factibilidad técnica y económica de obtener cloruro de potasio, ácido bórico y carbonato de litio del Salar de Atacama y determinar si era un proyecto rentable.

Para diseñar un sistema de pozas de evaporación solar de gran escala se necesitaba información de las condiciones meteorológicas, por tanto el grueso de las pruebas había que hacerlas a pleno sol, en el inhóspito y abrasador ambiente del Salar.

Al principio los trabajadores y geólogos encargados de la exploración y estudio del terreno caminaban a pie por la afilada costra del Salar. Con una máquina bulldozer se allanaban huellas en el terreno para que pudiera entrar una camioneta y llevarlos de vuelta al campamento. Metro a metro fueron construyendo los primeros caminos para moverse más fácilmente por la faena. Se perforaron 34 pozos de estudio con una base de motor petrolero y se hicieron las primeras pruebas de bombeo de salmueras.

Como casi no había infraestructura, los primeros geólogos e ingenieros que hicieron el estudio y exploración del proyecto arrendaron una casa en Toconao, hasta que se terminó el primer campamento de Minsal en dicho pueblo atacameño. Un campamento pequeño, con un buen casino y alojamientos construidos de piedra volcánica gris, característica de las viviendas de dicha comunidad. Ahí se alojaron todos los profesionales norteamericanos y chilenos que participaron en el estudio.

Se creó una estación meteorológica en el terreno que medía la va-

riación de tiempo, temperatura, humedad, vientos y de presiones de vapor porque todos esos factores afectan las tasas de evaporación solar. También el tamaño y profundidad de cada poza tenía que ser cuidadosamente medido ya que se necesita mucha superficie para que la evaporación sea eficiente.

El norteamericano Jerome Lukes fue el encargado de diseñar el sistema de evaporación solar del proyecto Minsal, que en el futuro sería la base del gigantesco complejo de pozas que hoy mantiene SQM Salar en ese mismo terreno. Lukes, que murió en 2016, era descrito por quienes lo conocieron como un extraordinario ingeniero de procesos, con un particular sentido del humor y un gusto por estar en terreno, atento a cada detalle. Chequeaba y rechequeaba con minuciosidad los datos de las pruebas de bombeo y llevaba a todas partes un paquete de disquetes en donde guardaba la información.

En un laboratorio piloto al este de donde está ubicado actualmente SQM Salar, Lukes hizo pruebas con bateas metálicas semiindustriales para simular un sistema de pozas de evaporación solar. Y lo más complejo: para calcular cómo van cambiando la química de la salmuera, las tasas de evaporación, las concentraciones, las sales que precipitan y los traspasos de poza en poza para ir concentrando las sales que se requerían.

De esas pozas piloto hoy solo quedan unos rastros de bateas metálicas corroídas por la sal y algunas casetas de madera donde se guardaban las cosechas de las pozas. Pero el valioso conocimiento químico y matemático de los diagramas de fase de evaporación en el Salar calculados por Lukes y su equipo están preservados en dos libros que son legendarios entre los procesistas de SQM, llamados Libro Rojo y Libro Azul. Uno detalla los equilibrios químicos en las plantas y el otro los diagramas de fase en las pozas de evaporación. Ambos libros están en la biblioteca de SQM en Antofagasta y sus fotocopias aún son consultadas en el área de procesos del Salar, porque siguen siendo la piedra angular del modelo químico de evaporación de las salmueras.

Después de la simulación en bateas metálicas había que probar con piscinas de evaporación reales sobre la desafiante y hostil superficie del

Salar. Julio Mondaca, atacameño oriundo de Toconao y hoy supervisor en terreno del área de hidrogeología de SQM, fue uno de los primeros técnicos en trabajar en la construcción de pozas de evaporación para el proyecto Minsal. El primer estudio que hicieron los geólogos fue en la zona de arcillas al noroeste del núcleo del Salar. Querían hacer pozas de evaporación con fondos naturales, aprovechando la impermeabilidad de la misma arcilla. Este trabajo lo hacían cuadrillas compuestas por un geólogo y dos ayudantes que caminaban todo el día bajo el sol, con agua en una mochila, herramientas y las coordenadas marcadas por un topógrafo, sin GPS.

Era un trabajo de gran esfuerzo físico y también arriesgado, porque una caída significaba hacerse cortes en las manos o las piernas. La prevención mejoró considerablemente en los años siguientes para evitar esos posibles accidentes. Cada 100 metros de distancia tenían que cavar un pozo manualmente, rompiendo con un chuzo la primera capa salina de halita, durísima y filosísima, que en algunos casos era de cinco centímetros de profundidad, pero en otros de 25 o 30. Al pasar esa costra dura comenzaban distintas capas de material más blando, abundante en arcilla. Generalmente los pozos de estudio eran de un metro y medio. Mientras cavaban, los ayudantes sacaban muestras de arcilla, materia orgánica, yeso y distintos materiales que el geólogo analizaba con lupa, ácido y otros químicos para ver el pH y las características de la materia orgánica. El objetivo era encontrar el lugar óptimo para hacer pozas naturales con las arcillas del Salar. Ese proyecto finalmente no resultó porque la zona era muy blanda, el terreno se hundía y las valiosas salmueras se filtraban por el fondo de las pozas de arcilla.

Al fracasar las pozas naturales, Jerome Lukes comenzó a estudiar un nuevo diseño para pozas “artificiales”. Emparejaron la costra del terreno y pusieron una capa de material fino de sales de halita como base en el piso de cada piscina. Después hicieron pruebas con una membrana plástica negra de PVC resistente que hasta hoy se usa para impermeabilizar las pozas de evaporación en el Salar de Atacama junto a otras capas de geotextil unido por termofusión.

En 1989 Minsal terminó el estudio de factibilidad del proyecto del Salar. Las pozas de evaporación y las plantas químicas ya tenían listos sus diseños de operación. Los ingenieros y profesionales del estudio pensaban que Amax, la empresa norteamericana que era referente mundial en producción de potasio, se iba a encargar de construir las plantas y comenzar a producir. Pero pasaron los meses, los años y eso no ocurrió. El estudio de factibilidad del proyecto concluyó que se requerían 360 millones de dólares de inversión para producir cloruro de potasio, sulfato de potasio, ácido bórico, carbonato de litio e hidróxido de litio, más costoso de lo que se proyectó inicialmente. Amax no se decidió a hacer la cuantiosa inversión.

En 1992 Amax y Molymet, que tenían el 75% del proyecto Minsal, pusieron a la venta su porcentaje de participación. Era la oportunidad que SQM esperaba con ansias y hasta con una cuota de agonía.

La sobrevivencia de la compañía estaba en juego.



En 2023, cada media hora sale un camión cargado de salmuera concentrada en un 6% de cloruro de litio que es bombeada desde las pozas de evaporación solar del Salar de Atacama. El siguiente destino es la Planta de Químicos de litio El Carmen, en donde la salmuera pasará por distintos procesos hasta obtener un producto terminado de litio superior al 95,5% de pureza.



La llegada de SQM al Salar de Atacama

En 1986 SQM empezó a producir las primeras partidas de su fertilizante estrella, el nitrato de potasio, elaborado a partir de nitrato de sodio y cloruro de potasio. Por su gran poder nutritivo y fertilizante, este nuevo producto empezó gradualmente a desplazar las ventas del tradicional salitre y, por primera vez en muchos años, las utilidades de la empresa empezaban a subir. SQM obtenía abundante nitrato de sodio del caliche de la pampa, pero debía importar todo el cloruro de potasio, que no se producía en Chile. Ya en los años 70 la compañía había estudiado junto a Corfo la factibilidad de extraer 200.000 toneladas anuales de cloruro de potasio del Salar de Atacama, pero por la profunda crisis que atravesaba la industria del salitre no contaba con los recursos para un proyecto de esa magnitud. El cloruro de potasio lo compraba en Rusia, Israel, Jordania y, sobre todo, en Canadá, el principal productor. Hasta fines de los 80, esto no fue problema, porque el precio promedio del cloruro de potasio no superaba los 100 dólares. Pero, a partir de 1990, el escenario cambió. La principal productora de potasio del mundo, la canadiense Potash Corporation of Saskatchewan (PCS), fue privatizada y empezó a producir menos y a cobrar más. A Bill Doyle, el nuevo CEO de PCS lo llamaban *Five Dollar Bill*, porque todos los meses subía cinco dólares el precio del cloruro de potasio.

En SQM estaban desesperados. A esas alturas importaban 250.000 toneladas al año de cloruro de potasio para producir sus fertilizantes y el encarecimiento astronómico de su materia prima les hizo perder todo el margen de utilidades que habían logrado en los últimos años. Tampoco podían subir el precio de su nitrato de potasio, porque su principal competidor, la empresa israelita Haifa Chemicals, todavía dominaba el mercado de los fertilizantes de especialidad y aprovecharía cualquier traspié de la compañía chilena para aumentar su ventaja. Ellos tenían a la mano el Mar Muerto, la mayor fuente de cloruro de potasio de Medio Oriente, y la subida de precio de los canadienses no les afectaba.

Hasta que en 1992 Amax y Molymet licitaron su participación de 75%

La licitación del Proyecto Minisal en 1992 era justo el salvavidas que SQM necesitaba para salir a flote: una fuente cercana y propia de cloruro de potasio, a solo 200 kilómetros de sus plantas salitreras de María Elena y Pedro de Valdivia. La posibilidad de explotar comercialmente litio, sulfato y boro de las reservas del Salar de Atacama también resultaba interesante para una compañía cuyo negocio primario era elaborar productos a partir de sales.

en Minsal. Era justo el salvavidas que SQM necesitaba para salir a flote: una fuente cercana y propia de cloruro de potasio, a solo 200 kilómetros de sus plantas salitreras de María Elena y Pedro de Valdivia. Además, la posibilidad de explotar comercialmente litio, sulfato y boro de las mismas reservas del Salar de Atacama también resultaba interesante para una compañía cuyo negocio primario era elaborar productos a partir de sales.

Sin embargo, enfrentaban la misma maldición que en las ocasiones anteriores. No había dinero para presentar una oferta por el Salar. En medio de la situación financieramente peliaguda que atravesaba SQM, obtener la concesión del Salar de Atacama parecía una quimera, pero al mismo tiempo era un asunto de vida o muerte. Acaso la única oportunidad para dejar de sobrevivir de una crisis a otra, como venían haciendo hacía décadas, y consolidarse, ser competitivos y prosperar de una vez por todas.

Al concurso público del 75% del Salar de Atacama se presentaron la estadounidense FMC Lithium (ex Lithium Corporation), una de las dos grandes empresas de litio a nivel mundial, que producía carbonato de litio en Carolina del Norte a partir de un mineral en roca llamado espodumeno y codiciaba el rico yacimiento de litio chileno; y SQM, que necesitaba ante todo el cloruro de potasio.

FMC ofreció siete millones de dólares al contado. SQM no tenía ni de lejos una cifra similar. Pero al directorio se le ocurrió una propuesta insólita para este tipo de licitaciones, y asaz tentadora: 12 millones de dólares a pagar en 12 años. Para un millón de dólares anual sí podían hacer caja. Aunque se pagara en cuotas, era casi el doble de lo que ofrecían los norteamericanos. Y a Corfo, dueña del otro 25%, también le pareció más favorable para los intereses del país que la licitación la obtuviera una empresa chilena. Finalmente, Amax y Molymet escogieron la oferta de SQM, que se quedó con el 75% del proyecto Minsal, mientras que el 25% restante seguía en manos de Corfo. En la misma mesa de negociación, un ejecutivo de Amax llamó a su contraparte de FMC para notificarle que no firmarían con ellos. El directivo de FMC reclamó, ofuscado: “¡Pero cómo! ¡Si teníamos el acuerdo listo! ¿Cómo que cerraron con Soquimich?”



Las pozas de evaporación solar están impermeabilizadas con una capa de plástico HDPE, una capa de geotextiles y una capa gruesa de halita del mismo salar, para fortificar y darle un mayor sellado a los pisos de las pozas y evitar que el peso de camiones y cosechadoras de pozas dañen los textiles impermeabilizantes.



Sin perder el tono impasible, el norteamericano de Amax le soltó tres palabras en inglés: “*Life is difficult*”.

Los ejecutivos de SQM repitieron esa frase durante muchos años cada vez que una situación lo ameritaba. Esa noche, con la licitación del Salar de Atacama ganada, el directorio y los gerentes de SQM descorcharon champañas para celebrar. Todo indicaba que a ellos las dificultades se les terminaban.

Sin embargo, con los 12 millones de dólares a pagar en cuotas habían obtenido la concesión de un proyecto que por ahora solo existía en el papel. Del proyecto minero anterior de Amax y Molybdenum solo quedaba como vestigio el campamento minúsculo en Toconao, algunos pozos de exploración y pozas piloto abandonadas en el Salar, nada más. Había que construir la infraestructura desde cero.

Cuando el equipo de estudio logístico de SQM fue por primera vez a recorrer las pertenencias en el Salar de Atacama, con mapas del Instituto Geográfico Militar en mano, no existían las carreteras que hay actualmente. Solo había unas huellas hechas por antiguos mineros apenas visibles en el mapa y un par de caminos aplanados con retroexcavadora por el proyecto Minsal, desde el campamento de Toconao hasta las antiguas pozas de evaporación piloto. Hicieron pruebas con una máquina para enrasar el Salar, porque era imposible caminar y menos desplazarse en vehículo sobre la resquebrajada superficie salina, cortante como terrones de vidrio. Pese a la ayuda de los mapas, al caer la noche el equipo se perdió. Tuvieron que subir a un cerro para encontrar señal con un celular satelital. Recién a la una de la mañana los miembros de la angustiada expedición lograron encontrar una huella antigua y volver a la carretera hacia San Pedro de Atacama.

De vuelta en la civilización, los profesionales se desvelaron pensando en la locura en que se habían metido. Ellos eran salitreros, calicheros, y no sabían nada de salmueras ni de salares. No tenían dinero para construir una faena desde cero en ese entorno hostil a la vida humana, ni la tecnología, menos la experiencia de explotar un salar. Solo los sostenía la necesidad imperiosa de asegurarse su propio cloruro de potasio.

Necesitaban conseguir financiamiento y llegaron a la conclusión de que la mejor opción era emitir acciones e invitar a inversionistas a inyectar capital fresco a la compañía. El área de finanzas de SQM propuso, tímidamente al principio, la idea de emitir acciones en la bolsa de Nueva York, o American Depositary Receipts (ADRs). A esa fecha, solo una empresa chilena lo había logrado: CCU, en septiembre de 1992. Otro desafío fue idear una fórmula para emitir más acciones, perdiendo parte de las propias, pero sin perder el control de la empresa. Se les ocurrió crear dos series de acciones, las clase A y las clase B. La serie A elegiría a siete directores y la serie B, que es la que se emitiría internacionalmente como ADR elegiría a un director. Cinco directores y gerentes de SQM viajaron a Nueva York a buscar inversionistas. Presentaron una Initial Public Offering frente a accionistas y ejecutivos de empresas en Nueva York y con una presentación en power point defendieron, con más ganas que recursos, que eran una compañía capaz de producir 250.000 toneladas anuales de cloruro de potasio en el Salar de manera rentable. También recorrieron Europa en busca de inversionistas internacionales y recolectaron más de 100 millones de dólares, superando las expectativas del directorio de SQM. El 21 de septiembre de 1993 se emitieron las primeras acciones o ADRs de SQM en la bolsa de Nueva York, la segunda empresa chilena en lograrlo. Actualmente la acción de SQM es la chilena más transada en la bolsa de Nueva York.

Ya aperados para lanzar la operación, el 12 de noviembre de 1993 los ejecutivos de SQM firmaron los contratos de arrendamiento por el 75% del proyecto Minsal, con la aprobación de Corfo para operar hasta 2030 y 16.384 pertenencias mineras de Corfo en arriendo. En esa compra SQM se quedó con el traspaso de todos los estudios técnicos y de factibilidad realizados en los años anteriores para el proyecto Minsal y el diseño del sistema de evaporación solar y de las plantas, que sentaron las bases de cómo se tenía que trabajar a futuro. Había 34 pozos productivos funcionando con una base de motor petrolero. Algunos de ellos siguen produciendo salmueras hasta hoy. Otros quedaron tapados porque SQM construyó algunas de las primeras pozas de evaporación solar sobre esos terrenos.

Una de las primeras inversiones fue una máquina especial para enrasar el salar y abrir paso para que transitara el ejército de camiones de las empresas constructoras que levantarían en menos de un año los pozos productivos, las pozas de evaporación, las oficinas y la primera planta para producir 250.000 toneladas anuales de cloruro de potasio. Ese era el objetivo urgente y prioritario.

El foco todavía no estaba puesto en el litio.

Ese primer año comenzaron a construir las pozas de evaporación de la 1 a la 14, que eran las pozas potásicas en que precipitan las sales de silvinita, que se cosechan y procesan en la planta MOP I para extraer cloruro de potasio. Después se siguieron ampliando y completando las líneas de pozas para continuar las etapas posteriores de bischofitas y carnalitas, de las que se obtendría un líquido concentrado en un 6% de litio.

Durante los primeros dos años Jerome Lukes volvió al Salar a trabajar como consultor en el desarrollo de las pozas de evaporación solar y de la planta de cloruro de potasio. Cada semana controlaba con el equipo operativo de pozas los trasposos de salmuera de un lugar a otro. El proceso completo de evaporación, desde la primera poza hasta la cosecha, podía tardar alrededor de un año.

Los ingenieros de la compañía debieron superar varios obstáculos para lograr un producto de calidad en la recién construida planta de cloruro de potasio, como usar filtros en lugar de centrífugas para secar las sales. El cloruro de potasio del Salar de Atacama tenía características singulares y complejas, como la granulometría, mucho más fina que la de otros yacimientos del mundo. También es mucho más abrasivo que lo habitual y la empresa tuvo que desarrollar materiales propios para que los equipos y repuestos resistieran al menos cuatro meses. Fue un trabajo a contrarreloj para desarrollar tecnologías y métodos propios que permitieran adaptar los procesos de la planta.

Ya en 1995 la primera planta construida en el Salar de Atacama por la empresa alcanzó la meta de producir 250.000 toneladas de cloruro de potasio. Y en 1996 la planta ya había duplicado su producción a 500.000

toneladas. Durante los primeros años todo era para consumo interno, se enviaba directamente a las plantas de nitrato de potasio de SQM y ya no se tuvo que importar ni un gramo más de cloruro de potasio. Al revés, se empezó a exportar el excedente. Al lograr la sinergia entre ambos minerales –el nitrato de sodio, que venía del salitre de la pampa, y el cloruro de potasio de las salmueras del Salar de Atacama– el nitrato de potasio de SQM pasó a ser imbatible y defenestró de su sitio a Haifa Chemicals, algo que nunca hubiera ocurrido sin el Salar.

En diciembre de 1995 Corfo estimó que su misión de garantizar que el proyecto de explotación del Salar se llevara a cabo estaba cumplida y vendió en remate público su 25% de participación en el proyecto Minsal. En menos de dos años ese porcentaje había triplicado su valor en el mercado y fue adquirido por SQM en siete millones de dólares. Con esta compra, la empresa chilena quedó con el 100% de la propiedad de Minsal y en 1998 la sociedad cambió de nombre de Minsal a SQM Salar.

El norteamericano Jerome Lukes controlaba los trasposos de salmuera con el equipo operativo de pozas. El proceso completo de evaporación, desde la primera poza hasta la cosecha, podía tardar alrededor de un año.

La conquista del litio

Entusiasmados por el éxito del cloruro de potasio, en 1995 los ejecutivos de la compañía decidieron ir por el mercado del litio. Cuando SQM empezó a explotar el Salar de Atacama en 1993, este mineral estaba lejos de su atención, porque la prioridad era extraer el cloruro de potasio para abaratar los costos de su nitrato de potasio. Pero en 1995 el litio ya presentaba un atractivo precio de 4.000 dólares la tonelada. Y, después de todo, la salmuera que extraían del Salar era tan rica en cloruro de potasio como en litio. Aprovechar ese litio que ya se estaba concentrando en sus pozos de evaporación era el paso lógico siguiente.

A fines de 1996 el litio se usaba principalmente en industrias de grasas lubricantes, de pinturas, en la fabricación de aluminio, cerámicas y vidrios, en metalurgia y construcción. El litio era un *commodity* industrial que crecía poco, en torno a un 3% anual. El mercado de las baterías para teléfonos móviles, notebooks y autos eléctricos aún no se asomaba. Los celulares recién estaban comenzando su masificación y sus baterías eran de níquel cadmio. Los países que producían litio eran Rusia, Estados Unidos y China. En Chile, la Sociedad Chilena del Litio, perteneciente entonces a la norteamericana Foote Minerals y hoy a Albemarle, extraía unas discretas 5.000 toneladas anuales de litio en su licitación del Salar de Atacama y lo mismo hacía FMC (ex Lithium Corporation) en el Salar Hombre Muerto en Argentina. Australia, que actualmente es el mayor proveedor de litio metálico en el mundo, vendía pequeñas partidas de concentrado de espodumeno a algunas plantas refinadoras en China. El negocio del litio en el mundo cuando SQM hizo su entrada en 1996 no había variado desde los años 70: era un mercado pequeño y extremadamente concentrado. FMC y Foote Minerals, las dos empresas dominantes que poseían minas de litio en Rusia, China y Estados Unidos, tenían a este mineral casi bajo un cartel, a precios que bordeaban los 4.000 dólares por tonelada y con una oferta restringida.

Como SQM no tenía profesionales con conocimientos técnicos so-

Las soluciones concentradas en un 6% de litio al final del sistema de evaporación se enviaban en camiones para ser tratadas en la planta de carbonato de litio de Salar El Carmen. En diciembre de 1996 se embarcó el primer cargamento de 8.000 toneladas de carbonato de litio a la filial comercial de SQM en Europa.

bre la producción de litio, trajo a los mismos expertos y operadores técnicos que habían creado las plantas de carbonato de litio de la competencia diez años antes. Eran 25 personas de la Sociedad Chilena del Litio (actual Albemarle), sus vecinos en el Salar, que fueron contratadas para diseñar los nuevos procesos y sumar la tecnología necesaria para producir carbonato de litio, incluyendo a Felipe Anguita, el antiguo gerente de producción.

Estos especialistas desarrollaron la primera planta de carbonato de litio en el Salar El Carmen, en las afueras de Antofagasta. Una planta pequeñísima para los tiempos actuales, pero grande para ese entonces, con capacidad para producir 8.000 toneladas anuales. Una vez que la planta estuvo construida, a fines de 1996, la puesta en marcha por este experimentado equipo duró solo dos semanas.

Jerome Lukes se encargó de diseñar el circuito o *string* de pozas de evaporación solar que seguiría concentrando las soluciones, tomando como base las salmueras que quedaban al final del proceso de concentración y de cosecha del cloruro de potasio. Era un proceso complejo de evaporación, de poco más de un año de duración y de constante vigilancia de los equilibrios químicos y físicos, para recuperar finalmente una salmuera con un 6% de concentración de litio. Uno de los mayores desafíos era controlar que no se enviaran a las pozas de litio salmueras que fueran altas en sulfato, porque este mineral hacía que el litio precipitara como sal y se perdiera hasta un 80% del litio en el proceso. Se armó entonces un sistema de *string* distinto de pozas para cada producto. Las salmueras bajas en sulfato se enviaban a las pozas de potasio y litio; las de alto sulfato se enviaban a las de sulfato de potasio y las de mediano sulfato se enviaban a las de cloruro de potasio, para lograr rendimientos óptimos.

Las soluciones concentradas en un 6% de litio al final del sistema de evaporación se enviaban en camiones para ser tratadas en la flamante planta de carbonato de litio de El Carmen. En diciembre de ese año se embarcó el primer cargamento de 8.000 toneladas de carbonato de litio a la filial comercial de SQM en Europa.

Mientras la planta producía y envasaba en sacos sus primeras partidas

La estrategia que adoptó SQM fue bajar agresivamente el precio. A SQM le importaba tan poco el precio en ese momento que los reportes de venta de carbonato de litio de la gerencia comercial durante todo 1997 hablaban solamente de cantidades vendidas y no de montos.

de carbonato de litio, los ejecutivos del área comercial viajaron a China y a Rusia a investigar el mercado. Comprobaron que el costo de producción de sus competidores, que extraían carbonato de litio a partir de espodumeno, un mineral en roca, era de 3.000 dólares por tonelada. En comparación, el costo de producción de litio de SQM a partir de la salmuera era ridículamente barato: ¡800 y hasta 600 dólares por tonelada! Esto se debía a que gran parte del costo –el bombeo desde los pozos, los largos meses de evaporación en las pozas, la cosecha de las sales de potasio– ya había sido absorbido antes por la producción de cloruro de potasio. Y, sobre todo, a que la concentración de litio en la salmuera del Salar de Atacama era de hasta 0,35% –y 0,20% en promedio–, simplemente insuperable como yacimiento, lo que abarataba mucho el proceso. El único gasto extra para producir litio era el costo de la ceniza de soda que se usaba como parte del proceso de purificación en la planta. Aún no habían vendido ni un gramo, pero ya tenían en sus manos una enorme ventaja: el litio con el costo operacional más bajo del mundo.

La primera exportación de carbonato de litio de SQM llegó a Europa en diciembre de 1996 y en 1997 comenzaron las ventas de litio a los clientes finales. La estructura comercial de SQM estaba organizada en filiales en el extranjero que vendían los productos de la compañía a los clientes finales. La comercialización del litio comenzó de manera muy incipiente, como un producto anexo dentro de la organización de ventas de nitrato. Los mismos comerciales que vendían nitratos y yodo de uso industrial a empresas de vidrios y cerámicas en Europa comenzaron también a ofrecer y llevar saquitos de muestra con carbonato de litio a clientes afines.

Sin embargo, a los comerciales se les hizo imposible convencer a los industriales, quienes reaccionaron con una enorme reticencia. Nadie les quería comprar. Ni siquiera accedían a hacer pruebas con el producto, desconfiaban de la calidad. Por los comentarios de los clientes, se dieron cuenta de que las dos compañías norteamericanas que dominaban el negocio le estaban haciendo una guerra sin cuartel a este nuevo actor sudamericano que venía de un país lejano llamado Chile.

Además, los clientes tenían buenas razones para no querer arriesgarse con un fabricante nuevo. En el caso de los productores de vidrio, por ejemplo, deben fundir cientos y hasta miles de toneladas de una receta específica de materias primas dentro de un horno, que es alimentado de manera continua. Si el carbonato de litio chileno no cumplía las especificaciones exactas, significaba la pérdida de cientos de toneladas de material que tendrían que reciclar y fundir de nuevo.

Lo único que podía romper esa resistencia al riesgo era un incentivo económico imposible de rechazar. La estrategia que adoptó SQM fue bajar agresivamente el precio. Empezaron a ofrecer carbonato de litio a 1.600 dólares por tonelada. E incluso menos. Los comerciales tuvieron chipe libre para hacer ofertones. El objetivo era generar volumen de venta como fuera para ganar *market share*. A SQM le importaba tan poco el precio en ese momento que los reportes de venta de carbonato de litio de la gerencia comercial durante todo 1997 hablaban solamente de cantidades vendidas y no de montos.

Como eran nuevos en el mercado y tenían escaso conocimiento de las necesidades de los clientes, la estrategia contempló también apoyarse en gente que conocía el negocio del litio y sus complejidades. Los primeros contactos exitosos con compañías se lograron a través de agentes intermediarios como Jenny Matis, una comisionista alemana que ayudó a cerrar la primera venta de litio de SQM a Schott, una empresa de Alemania dedicada a la fabricación de vidrios especiales, que años después fabricaría los lentes del mayor observatorio del mundo, ELT (Extremely Large Telescope), en las proximidades de Antofagasta, también con litio de SQM.

Ese primer contrato en 1997 por 500 toneladas anuales de carbonato de litio fue un hito que los ejecutivos celebraron, porque significó cerca de un 20% de la producción de SQM. Al poco tiempo se sumó otro cliente importante, Ferro Corp., una empresa norteamericana de cerámicos. Entre Schott y Ferro, ya tenían vendida la mitad de la producción del Salar y con contratos de largo plazo a precios muy atractivos. Ser proveedores de dos empresas grandes allanó el camino para que otros clientes se atrevieran a probar. Además, a ese precio, ¿qué comprador podía resistirse?

Para los competidores fue una debacle a nivel mundial. En pocos meses el precio de mercado del carbonato de litio bajó más de un 60%. Cerraron plantas en China, en Rusia y en Estados Unidos. En Australia paralizaron un proyecto muy avanzado de planta de carbonato de litio a partir de espodumeno, porque claramente no podían competir por costo con SQM. Los hábiles chinos de la empresa Seimi, que tenían una antigua planta de 5.000 toneladas de litio en Zhejiang, al darse cuenta de que no podían competir, negociaron con SQM para ser sus representantes y distribuidores en China. Durante años se mantuvo esa doble relación de cliente-competidor, hasta que finalmente cerraron su planta. Fue la manera de entrar al hermético mercado chino en una época en que SQM aún no tenía oficina comercial propia en ese país.

Otra víctima del “terremoto SQM” fue la norteamericana FMC, que estaba con dificultades para hacer funcionar su planta de carbonato de litio en el Salar Hombre Muerto, en Argentina. También eran grandes productores de ceniza de soda, el principal insumo que SQM usa para procesar el carbonato de litio. Acordaron proveer de ceniza de soda a SQM Salar y que la empresa chilena procesara su carbonato de litio en la planta de El Carmen, bajo un contrato de maquila. FMC era un cliente, porque SQM le

La irrupción de SQM cambió para siempre la industria mundial del litio. Muchas empresas tecnológicas comenzaron a estudiar su potencial en nuevas aplicaciones, como los cátodos para baterías.

vendía volúmenes importantes de litio, pero en el mercado final seguían siendo competidores. Fue otra de las poco convencionales medidas tomadas en esos primeros tiempos que permitieron aumentar el nivel de producción. Después de varios años dicho matrimonio por conveniencia se acabó, porque FMC resolvió sus problemas en Hombre Muerto y echó a andar la planta y, a su vez, SQM ya había ampliado su cartera de clientes.

Mientras sus competidores cerraban, se achicaban o se adaptaban como fuera para sobrevivir, SQM fue el único productor de litio que quedaba en condiciones de aumentar la oferta y seguir creciendo a todo vapor. En 1998 la empresa invirtió 54 millones de dólares en una segunda planta de carbonato de litio, adyacente a la primera, con una capacidad de 17.500 toneladas anuales, con una pureza de 99% y bajo contenido de boro y sulfato. La transición de ser el productor nuevo y emergente que buscaba desesperadamente clientes a convertirse en el mayor proveedor mundial de carbonato de litio ocurrió de forma vertiginosa. En un plazo de tres años, SQM dio vuelta el tablero y conquistó el liderazgo, llegando a producir el 33% del litio en el mundo.

La irrupción de SQM cambió para siempre la industria mundial del litio, porque al bajar el precio en más de un 60%, muchos centros de investigación y empresas tecnológicas comenzaron a estudiar el litio y su potencial en nuevas aplicaciones, como los cátodos para baterías. Por su precio más accesible y mayor cantidad disponible en el mercado, el litio empezó a ser seleccionado como material para nuevos usos industriales, comerciales y tecnológicos. En los siguientes años los institutos de investigación y productores tecnológicos aceleraron el desarrollo de nuevas aplicaciones que revolucionarían el mundo, como las baterías para *smartphones*, *tablets* y electromovilidad.



Los sistemas productivos de SQM Salar

PARTE I

La construcción de las pozas de evaporación solar

En total, las pozas cubren una superficie superior a los 47 km², lo que representa un 0,5% de la superficie del Salar. Las pozas son rectangulares, de 1,5 m de profundidad y de variadas dimensiones (600 x 800 metros o más) y se encuentran construidas sobre el salar mismo. Las pozas de mayor tamaño, que alcanzan una superficie superior a los 480.000 m², son las del sistema de halitas.

Paso 1

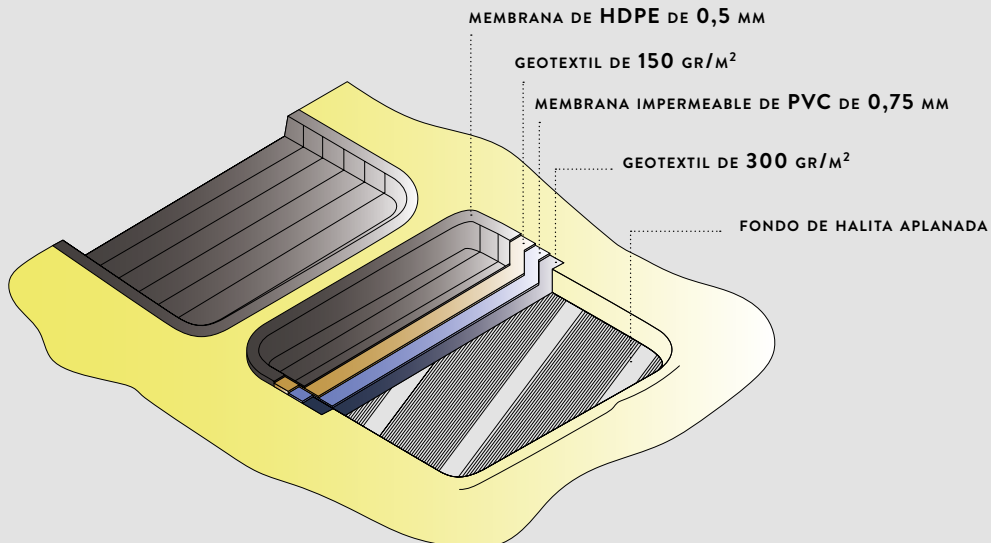
La primera etapa de la construcción de las pozas incluye el emparejamiento de la costra salina para generar una superficie horizontal y compacta. La construcción de las pozas dentro del Salar se efectúa rompiendo la costra salina y dejando una superficie plana en la cual yace una capa de arcilla. En esta etapa se forman además los muros de la poza.

Paso 2

La segunda etapa tiene por objetivo la impermeabilización de la poza ya aplanaada, así como de los taludes. Para ello se utiliza una capa de geotextil de 300 g/m² unido por termofusión, sobre la cual se dispone una membrana impermeable de PVC de 0,75 mm de espesor. Para impermeabilizar los taludes se dispone otra capa de geotextil de 150 g/m² la que también se cubre con una membrana de HDPE de 0,5 o 1 mm de espesor. Para asegurar la vida útil proyectada de las capas impermeabilizantes se sobrepone una capa de sales de halita de aproximadamente 50 cm de espesor, para atenuar el impacto por el traslado de maquinaria pesada sobre la poza durante el período de cosecha de las sales.

Paso 3

La interacción de la salmuera con los vientos en el Salar de Atacama tienen un impacto sobre el direccionamiento de los flujos de salmuera dentro de las pozas. Por este motivo el diseño debe considerar su orientación respecto a las corrientes de viento reinantes, así como la construcción de *baffles* que logren distribuir eficientemente las leyes de las sales precipitadas, evitando zonas de baja ley por efecto de volúmenes muertos. Este último caso se puede dar en los sistemas de silvinita, donde por efecto de zonas muertas puede haber un impacto negativo en la ley de potasio al precipitar carnalita de potasio. Por otra parte, los *baffles* hacen las veces de circuito en serie dentro de la poza, homogenizando eficientemente la salmuera.





PARTE II

El proceso de precipitación fraccionada en el Salar de Atacama

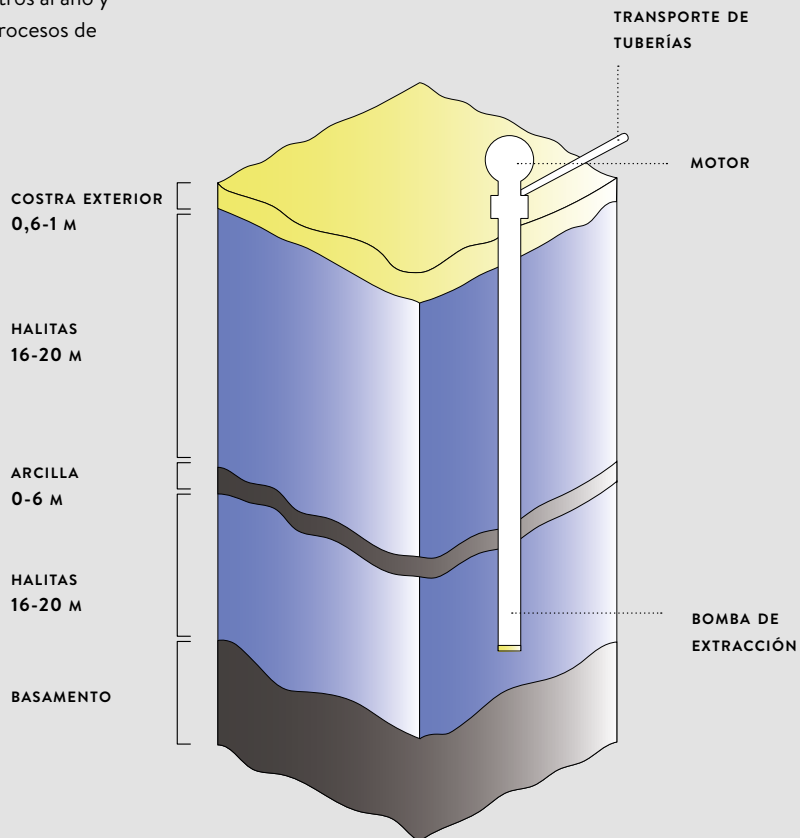
El método de precipitación fraccionada en pozas de evaporación solar es la técnica más utilizada para la recuperación de litio desde salmueras. Este proceso se ha mantenido vigente por años en las operaciones del Salar de Atacama por su bajo costo, menor consumo energético y manejo eficiente de los procesos. Cualidades potenciadas por las extraordinarias condiciones climáticas del Desierto de Atacama, el lugar más seco de la tierra, con un índice de evaporación solar de 3.200 milímetros, precipitaciones promedio de solo 15 milímetros al año y vientos que favorecen los procesos de concentración de salmuera.

**Paso 1
Extracción de Salmueras**

El proceso productivo a partir de las salmueras bajo la costra salina del Salar de Atacama comienza con la exploración y caracterización hidrogeológica del núcleo, para luego succionar las salmueras a través de bombas a profundidades superiores a los 40 metros desde más de 400 pozos activos.

**Paso 2
Distribución**

Las salmueras son clasificadas y distribuidas a través de tuberías de HDPE hacia las pozas de acumulación o canaletas que recogen la salmuera desde distintos pozos productivos. A diferencia de una poza de evaporación solar, estas canaletas pueden alcanzar varios kilómetros de largo y no superan los cinco metros de ancho.



Paso 3**Traspaso a las pozas de evaporación solar**

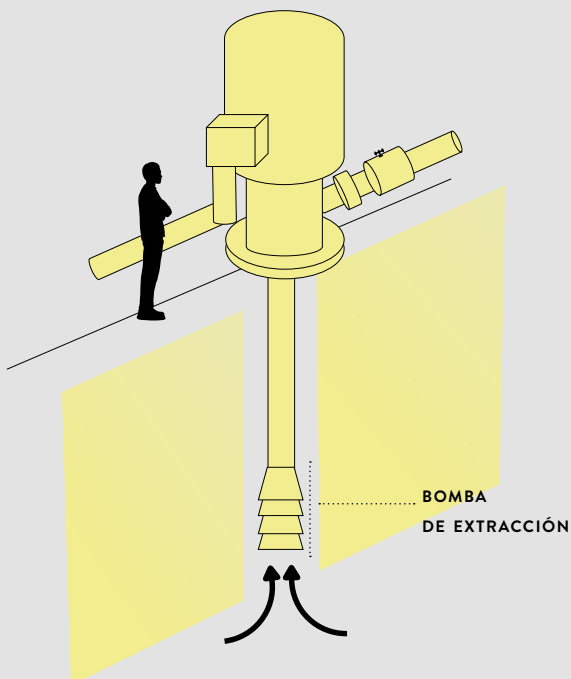
Mediante bombeo la salmuera es dirigida a través de tuberías a los sistemas de evaporación solar según las proyecciones de reposición de pozas a las dos grandes áreas del Salar, llamadas MOPH I y MOPH II. El sistema MOPH II presenta altas concentraciones de sulfato y boro. Los volúmenes de traspaso serán en función de las condiciones climáticas debido a que los mayores traspasos se concentran en la temporada de verano. En este período las tasas de evaporación alcanzan los máximos anuales.

Paso 4**Evaporación de salmueras en las pozas**

El proceso de evaporación solar genera la precipitación fraccionada de sales en un sistema multicomponente en función del grado de saturación en la salmuera. Resulta esencial conocer la solubilidad de los iones en estas soluciones salinas para la definición de los procesos de concentración y cristalización. El diseño de los procesos requiere de un método que permita determinar las curvas de equilibrio líquido-sólido en estos sistemas salinos, de ahí la importancia de contar con los modelos termodinámicos adecuados. El modelo de simulación termodinámico del proceso de cristalización en el Salar de Atacama se basa en

los parámetros calculados por Jerome Lukes y validados bajo el modelo Pitzer. El modelo de interacción iónica de Pitzer se ha utilizado ampliamente en la literatura para representar el equilibrio líquido-sólido de diversos sistemas de electrolitos acuosos.

Durante años en el Salar de Atacama se han utilizado los más avanzados simuladores de procesos, con el objetivo de optimizar la recuperación de litio en los sistemas de evaporación, así como para realizar las proyecciones de producción de estos sistemas en el mediano y largo plazo. Con esta información, las salmueras se someten a un programa cuidadosamente controlado de traspasos en serie y paralelo según la concentración de los elementos trazadores o de interés que definan la ruta de evaporación.





Desde que SQM ganó la licitación del Salar de Atacama en 1993 todo fue una historia de éxito fantástica para la compañía, con acciones de la empresa en la bolsa de Nueva York, abrazos, champaña y la gracia de ostentar los costos de producción de carbonato de litio más bajos del mundo. En un plazo récord de tres años habían logrado conquistar el liderazgo de la industria, llegando a vender un 33% del carbonato de litio en el planeta en 1999.

Pero hacia el año 2000 esta buena racha pareció apagarse. Por fluctuaciones del mercado comenzó un ciclo de bajos precios para todos los productos estrella de SQM –el nitrato de potasio, el yodo, el sulfato de potasio y también el litio– que azotó económicamente a la compañía.

A esto se sumó una serie de errores catastróficos que casi hundieron el proyecto del Salar. La compañía invirtió más de 100 millones de dólares en la construcción y puesta en marcha de una planta de sulfato de potasio, diseñada a partir del estudio realizado por Corfo y su Comité de Sales Mixtas antes de que se licitara el Salar. Levantarla fue mucho más costoso que todas las inversiones anteriores en el Salar de la compañía, y su resultado fue un fracaso estrepitoso. La planta se atrasó varios meses en estar operativa. Y cuando comenzó a producir, en 1998, los costos se comían las ganancias. Durante diez años su rendimiento siguió siendo menos de la mitad de las 250.000 toneladas anuales para las que se había diseñado. Para más remate, se rompieron dos de las pozas más grandes de evaporación solar, que se filtraron porque habían quedado mal construidas. Con eso perdieron otros 40 millones de dólares. La crisis consta en el valor de las acciones de SQM, que ese año cayeron.

Por todos estos motivos, el cambio de milenio inauguró un período complejo en el Salar de Atacama. Lo más alarmante era que la producción de litio, cloruro de potasio y de todos sus minerales sufría una baja sostenida. Años antes de que SQM comprara la concesión en 1993, los geólogos y especialistas estadounidenses que habían estudiado el proyecto del Salar de Atacama le habían augurado al yacimiento una vida útil de 20 años. La predicción parecía adelantarse. Las leyes de litio y potasio eran cada vez más pobres en todos los pozos que explotaban.

Pese a que la concesión tenía una extensión de 820 kilómetros cuadrados, la mayor parte de los pozos de explotación, las pozas de evaporación y la planta estaba concentrada en el núcleo del Salar, un espacio en donde se encontraban las mejores leyes según los estudios que había encargado Corfo. En ese punto escurrieron y se concentraron durante millones de años las salmueras más ricas en litio y potasio. Para las 600.000 toneladas de cloruro de potasio y las 15.000 toneladas de carbonato litio que producían anualmente tenían materia prima de sobra. Bastaba con perforar un pozo en cualquier lugar del núcleo para que brotaran salmueras de la mejor calidad. Sin embargo, después de casi siete años extrayendo salmueras de ese filón de cuatro kilómetros cuadrados, la inmensa riqueza comenzaba a agotarse. En 1998 había comenzado la expansión de la planta de carbonato de litio de 15.000 a 30.000 toneladas anuales, además de inaugurar nuevas plantas de sulfato de potasio, de ácido bórico y un aumento de capacidad de la planta de cloruro de potasio que necesitaban ser alimentadas de más salmueras. Si querían seguir creciendo se hacía urgente salir de la zona de confort del núcleo y explorar nuevos yacimientos.

En el año 2000 el geólogo Juan Molina, a cargo del área de hidrología del Salar, comenzó un proyecto de prospección para ampliarse hacia la zona suroeste junto a un equipo de 13 personas compuesto por un ingeniero, un geólogo y un grupo operativo dirigido por el técnico Helio Hernández, quien anteriormente había construido pozos de agua frente al campamento minero de Toconao con una máquina prospectiva Mustang. Esta pequeña cuadrilla, provista solo de una máquina de perforación, comenzó prácticamente desde cero a mapear la zona, a enrasar caminos y a perforar pozos en el hasta entonces inexplorado sector suroeste.

Esos primeros intentos de explorar la estructura subterránea del Salar se vieron frustrados por lo escurridizo que era el recurso que se ocultaba bajo la dura costra de sal. En el núcleo bastaba con perforar un pozo para que brotaran buenas salmueras. Pero esos buenos tiempos se habían ido. En este nuevo territorio las salmueras se desplazaban de lugar, cambiaban su química. Parecían esconderse a propósito y burlarse de la cuadrilla.

Esto ocurría porque subterráneamente, el Salar de Atacama es una matriz geológica sólida, de roca porosa. En los infinitos intersticios de esta gran esponja salina y porosa circula un líquido salino, denso y oleoso llamado salmuera, que tiene siete veces más sal que el agua del mar. Esta salmuera que se almacenó en la parte central del Salar de Atacama, en un proceso que tomó millones de años, es altamente rica en litio, cloruro de potasio y otros valiosos minerales. Es la materia prima que se extrae desde los pozos y que luego se concentra en las pozas de evaporación de SQM. Sin embargo, a diferencia de un yacimiento metálico o sólido, la salmuera es un yacimiento vivo, que fluye continuamente y va variando su composición química en el tiempo. La esponja sólida del Salar está formada por distintos acuíferos subterráneos y multiacuíferos, cada uno con sus propias químicas, en los que se acumularon las salmueras.

El equipo de exploración se encontró con que estos acuíferos eran tan delicados y sensibles que había químicas entre ellos que no eran compatibles. Si al perforar un pozo se mezclaban las salmueras de uno y otro acuífero –aisladas entre sí naturalmente por capas de yeso o de arcilla– ocurría una reacción química que las hacía precipitar de forma violenta. De su estado líquido pasaban a yeso o sal. El pozo se tapaba o su química cambiaba tanto que quedaba inservible.

Además, como en todo acuífero, al interior del Salar había pasos preferentes de salmueras. A veces los geólogos, al proyectar dónde hacer un pozo, le achuntaban justo a la salmuera. Otras veces resultaba que la salmuera estaba mucho más lejos y había que seguir buscando. En esa época Helio Hernández molió varios cascos a patadas, porque frecuentemente terminaba de hacer un buen pozo, con una ley, una química y un caudal de excelentes condiciones. Y a los seis meses ese mismo pozo podía cambiar tanto el caudal como la química. Era exasperante. Aunque llevaban más de 15 años extrayendo salmueras del Salar, tenían que reconocer que en realidad apenas lo conocían, porque solo habían explorado una ínfima parte de su superficie.

Para gestionar este yacimiento líquido y salino que se movía al interior de un medio rocoso y poroso no bastaba la geología ni la hidráulica.

Se requería un mix de ambas ciencias para entender cómo estaba formado este yacimiento, qué profundidad tenía, dónde localizar las salmueras, cuáles eran sus características químicas y dónde convenía perforar los pozos de extracción. En 2005 la compañía contrató al hidrogeólogo Corrado Tore, que comenzó la titánica tarea de desarrollar un modelo hidrogeológico del Salar. Pero con un solo profesional en su equipo y apenas diez operadores en terreno, la exploración avanzaba a paso de tortuga.



Una mina viva

El primer impulso para sacar al Salar de su crisis de crecimiento vino en 2006, cuando la Superintendencia de Medioambiente aprobó el nuevo estudio de impacto ambiental para la concesión del Salar de Atacama. Hasta entonces SQM tenía autorización para extraer 650 o 680 litros de salmuera por segundo en el área licitada. El nuevo permiso autorizó la extracción de 1.250 litros por segundo, lo que aumentaba la capacidad de producción a casi al doble. Para aprovechar las posibilidades que se abrían con toda esa salmuera adicional era necesario invertir para desarrollar nuevos procesos, plantas y pozas.

Como la producción de litio y potasio seguía alarmantemente a la baja, el directorio convocó desde el área comercial a un nuevo equipo a la gerencia de potasio-litio en el Salar, formado por Juan Carlos Barrera, Alejandro Bucher y Rodrigo Maffioletti. La misión era mejorar con urgencia la eficiencia en el Salar de Atacama.

Sabían que sería un desafío duro, pero no podían creer lo que escucharon cuando tuvieron la primera reunión en el norte. Cabizbajo, el encargado de yacimientos anunció que en el Salar solo quedaban reservas de litio y potasio para diez meses. No se referían a las reservas en stock ni en las bodegas. Eran las reservas en el yacimiento del Salar, según los sistemas de explotación y producción vigentes. Los ejecutivos quedaron en *shock*. No lo podían creer. Profundizaron la información con el único hidrogeólogo que había en el Salar, contratado hacía poco tiempo y que estaba desesperado.

Esto no podía estar pasando. Una compañía minera, por mucho que tuviera máquinas, plantas y gente, sin reservas no era nada.

La primera medida urgente y drástica fue generar un nuevo plan de inspección minera y de perforaciones. Hasta entonces se perforaban 6.000 o 7.000 metros al año. A partir de ese año se perforaron 100.000 metros anuales. Fue un cambio de mentalidad en que se definió que el desafío más complejo era lograr dominar este tipo de yacimiento: una mina viva, donde las salmueras circulan y cambian todo el tiempo. Lo que tenían que hacer

era entender el funcionamiento del Salar y explorarlo al revés y al derecho, y construir un modelo hidrogeológico capaz de proyectar a uno, tres y cinco años el comportamiento de sus salmueras.

Priorizar la hidrogeología del Salar e inyectarle recursos fue un giro fundamental, porque permitió tener claridad respecto a las reservas existentes y futuras. El equipo de Corrado Tore creció de diez personas y una sola máquina de perforación a 240 personas y siete perforadoras para hacer todas las exploraciones que se había propuesto. Y de los dos profesionales que había inicialmente, actualmente existen 45, de los cuales 35 son hidrogeólogos y 10 son geólogos.

En un principio intentaron externalizar las perforaciones, pero fue un desastre. Llegaron empresas especialistas en pozos de petróleo, con flamantes máquinas del año y sistemas de motorización computarizado. Al perforar, la salmuera salía a chorros, mojaba los equipos y se producían fallas. Se encontraron con una gran barrera tecnológica: la industria no estaba preparada para perforar salares ni salmueras. No existían en Chile las máquinas ni el conocimiento técnico.

Se definió que el desafío más complejo era lograr dominar este tipo de yacimiento: una mina viva, donde las salmueras circulan y cambian todo el tiempo.





Geólogos e hidrogeólogos del Salar estudian y clasifican cada pozo con ayuda de sondas y rayos gamma para evaluar la estratigrafía subterránea, su calidad para producir litio, potasio –o ambos– y las variaciones de sus características en el tiempo. Este seguimiento se hace de manera semanal, y hasta diaria en los pozos identificados como de mayor valor.

Las maquinarias hidráulicas más poderosas estaban diseñadas para perforar pozos petroleros en el lecho marino, pero no para las salmueras del Salar de Atacama, que son siete veces más salinas que el mar y diez veces más conductoras de electricidad que el agua, además de tremendamente abrasivas y corrosivas. Tampoco estaban adaptadas para el inclemente ambiente del Salar de Atacama, que en verano llega a 32 grados de temperatura y en invierno baja a -10. La dura sal de la superficie junto con el clima resultan tan hostil para los fierros, que la vida útil de cualquier cargador o camión de transporte en el Salar es la mitad que en la minería metálica.

Con todos estos obstáculos, el plan de exploración minera estaba atrasado, porque las máquinas de las empresas externas se echaban a perder y no lograban terminar los pozos.

Helio Hernández pidió permiso a Corrado Tore para usar su antigua máquina Mustang e instaló al lado de las enormes y modernas perforadoras su máquina chiquitita y logró construir exitosamente una decena de pozos de 100 metros de profundidad. Pero una buena exploración requería pozos de 300 y ojalá de 500 y 600 metros, a los que su fiel Mustang no lograba llegar.

El equipo de hidrología decidió comprar nuevas máquinas y modificarlas para hacer ellos mismos las perforaciones. Helio Hernández visitó a los principales fabricantes de maquinarias en Estados Unidos, Brasil, Italia y Estados Unidos en búsqueda de sistemas capaces de adaptarse a especificaciones que entonces parecían insólitas. A un productor de plataformas petroleras en Brasil le pidió un motor petrolero que fuera básico, solamente con señales neumáticas a través del aire e hidráulica, sin nada eléctrico. Pero que tuviera un radiador el doble de grande que el estándar, para evitar que se recalentara el motor con las altas temperaturas. Terminó trayendo al fabricante al Salar de Atacama para que comprobara con sus propios ojos a lo que se enfrentarían sus máquinas. A otro industrial de Estados Unidos le llevó testigos de diamantinas, es decir, cilindros sólidos de sal extraídos de los pozos de exploración, para que en su laboratorio midieran y entendieran

En poco tiempo el equipo de perforación desarrolló su propia forma de hacer los pozos, más barata y rápida, con máquinas que son manejadas, mantenidas y adaptadas por los técnicos y mecánicos del Salar. Sin embargo, después de los 400 metros volvieron a fallar. A esa profundidad costaba vencer la presión hidrostática que generaba la salmuera al interior del pozo, que se hacía más y más pesada.

la resistencia mecánica, la dureza y la fisicoquímica de la matriz a perforar. Cuando analizaron las muestras en su laboratorio, los norteamericanos no lo podían creer. Era como perforar en otro planeta. Le preguntaban a Corrado Tore: “¿Todo esto tiene el Salar?”.

En poco tiempo el equipo de perforación desarrolló su propia forma de hacer los pozos, más barata y rápida, con máquinas que son manejadas, mantenidas y adaptadas por los técnicos y mecánicos del Salar. Sin embargo, después de los 400 metros nuevamente comenzaron a fallar. A esa profundidad costaba vencer la presión hidrostática que generaba la salmuera al interior del pozo, que se hacía más y más pesada. Los aditivos que se usaban comúnmente en perforación petrolera para aglutinar e impulsar hacia afuera del pozo el material perforado no funcionaban porque los cloruros abundantes en la salmuera inhibían el efecto coagulante de la mezcla. Contactaron a marcas de espesantes industriales en Estados Unidos y ellos invariablemente pedían muestras de salmuera para crear una fórmula adecuada. Pero enviar salmuera a Estados Unidos estaba estrictamente prohibido. Los perforadores no sabían qué hacer. Los pozos se tapaban y no había aditivo que ayudara.

La solución surgió como una de esas ocurrencias que solo nacen ante el agobio y la angustia. Por culpa de los malditos aditivos, Helio Hernández estaba fumando más cigarrillos que nunca y fumar le daba sed. Comenzó a beber una cajita de jugo y de aburrido leyó la lista de ingredientes. Sus ojos quedaron clavados en la frase: “Espesante: goma xantana”. De inmediato buscó en Google qué era la goma xantana y descubrió que es un elemento natural que se usa para aglutinar las sopas, el yogurt, las calugas de caldo y todo tipo de alimentos de consistencia espesa. Si la goma xantana funcionaba con la comida, ¿lograría espesar la sopa de iones que estaban extrayendo del Salar de Atacama? Encargó 50 kilos de goma xantana a un proveedor de alimentos en Santiago y la mezcló con salmuera. ¡Eureka! ¡La salmuera se espesaba! Al probarlo en los pozos, resultó ser un excelente aditivo de perforación, ya que al inyectarla se transformaba en un líquido viscoso que encapsulaba todos los sólidos y limpiaba el pozo.



Todas las semanas el área de operaciones del Salar toma muestras líquidas de cada una de las pozas de evaporación solar para controlar en laboratorio cómo el sol y otras condiciones climáticas afectan la calidad química de las salmueras.



Además, era biodegradable y no generaba impacto en el ambiente.

SQM comenzó a importar toneladas de goma xantana desde un laboratorio chino. Actualmente, todas las empresas que venden aditivos para la perforación de salares los fabrican en base a goma xantana.

Así, con una serie de innovaciones en la manera de perforar y con máquinas diseñadas a medida y a puro ingenio propio, el equipo pudo llevar adelante el plan de hacer cientos de exploraciones de 100, 300 y hasta 600 metros de profundidad que iban ayudando a mapear el Salar por debajo.

Una de las innovaciones claves fue la creación de un sistema de perforación reversa adaptado a la realidad única del Salar. Este sistema reverso había sido inventado por norteamericanos para la minería en polvo, que no es compatible con el agua. Helio Hernández lo modificó para hacerlo funcionar en los pozos inundados de salmuera del Salar. Lo logró perforando los triconos e invirtiendo el sistema, para que lo que debía salir hacia afuera, saliera por dentro de la barra. De un sistema minero se pasó a uno inundado que permitía obtener muestras localizadas metro por metro de la química y de la geología. El sistema funciona con una barra que tiene doble funda. Entre la barra interior y la exterior hay un espacio por el que entra aire. El tricono, que es la herramienta que perfora, tiene dos agujeros que están hechos para que salga el aire por una zapata que va cerrando el pozo y obliga a que el aire se vaya por dentro de la segunda barra. Esto permite que los sólidos que se van moliendo con la perforación vayan saliendo por el tubo del medio de manera controlada, metro a metro. Así, en el exterior del pozo se pueden obtener muestras localizadas y precisas de cada metro de profundidad, para hacer una estratigrafía. Con estas muestras sólidas los geólogos e hidrogeólogos pueden estudiar cómo está formada la matriz geológica del Salar. También en cada metro se van obteniendo muestras líquidas de las salmueras para analizar químicamente. Luego se hace una prueba de bombeo para determinar las características hidráulicas del acuífero, es decir, cuántos litros por segundos se pueden extraer con una determinada química.

Con el estudio de estas muestras sólidas y líquidas en el laboratorio

Con un nuevo sistema de construcción con motoniveladora, más rápido y económico, el área construida de pozas solares aumentó de 40.000 metros cuadrados a 800.000. Fue un hecho inédito en el Salar, que inyectó confianza en todo el equipo en su capacidad de cumplir metas más ambiciosas.

de hidrogeología se ha podido desde entonces identificar cuáles pozos de exploración se podrían convertir en pozos productivos por la calidad química de sus salmueras. Una vez aprobado un pozo para su explotación, el equipo de pozos debe ser capaz de construir un pozo con su respectiva plataforma en que queden aisladas con cemento todas las zonas que no interesa tocar, para evitar que distintas químicas se mezclen y solo se extraiga salmuera del acuífero deseado, que puede estar a los 60 metros, a los 80, a los 120 o a otra profundidad identificada por los hidrogeólogos.

Los geólogos e hidrogeólogos en terreno del área de hidrogeología estudian y clasifican cada pozo, desde el primero hasta el último, con ayuda de sondas y rayos gamma para evaluar la estratigrafía subterránea, su calidad para producir litio, potasio o ambos y las variaciones que sufren sus características en el tiempo. Es un seguimiento que se hace de manera semanal y hasta diaria, en el caso de los pozos identificados como de mayor valor. En el noveno piso de las oficinas de SQM en Santiago trabaja un equipo de expertos de hidrogeología que creó un modelo de simulación hidrogeológica que está entre los más avanzados del mundo y que es alimentado con los datos y variables recogidos por mediciones diarias en terreno y modelos matemáticos y físicos para predecir cómo evolucionarán los pozos en términos de caudal y química en uno, dos o cinco años.

Gracias a este gran salto en la prospección de nuevos sectores y la hidrogeología del Salar, encontraron zonas de salmueras en el sector suroeste que también eran muy ricas en potasio y litio, lo que permitió aumentar la cantidad de pozos de producción. Al extraer nuevas salmueras necesitaban más líneas de pozos de evaporación para procesarlas. La metodología de construcción de pozos se hizo más eficiente al reemplazar una pesada cuadrilla de ocho camiones por un equipo de construcción con motoniveladora, más rápido y económico. Con este nuevo sistema el área de pozos solares construidas aumentó de 40.000 metros cuadrados a 800.000. Fue un hito inédito en el Salar, que inyectó de confianza a todo el equipo en su capacidad de cumplir metas mucho más ambiciosas.

Entre fines de 2007 y principios de 2008 todo este esfuerzo tuvo



su recompensa cuando ocurrió algo inédito: la ley de litio y de potasio subió. Salar de Atacama se convirtió en un caso único en el mundo, una mina que en mitad de su vida útil empieza a subir su ley en lugar de bajar, como ocurre siempre. Lejos de acabarse en unos meses, los hidrogeólogos comprobaron con datos certeros que tenían reservas aseguradas para sacar 2,5 millones de toneladas anuales de litio y potasio durante decenas de años más.

El otro cambio de paradigma durante ese período fue apuntar a que la mina comandara la operación y no al revés. Hasta entonces, la mina se adaptaba a las restricciones que imponía la planta. Eso significaba que si en un sector encontraban salmueras ricas en litio, pero con muchos contaminantes como calcio o magnesio, no se extraía. La estrategia se dio vuelta: del Salar se extraerían las salmueras con mejores concentraciones de litio y potasio y las plantas y procesos tendrían que adaptarse para sacarle el mejor provecho a esta materia prima. Esta nueva flexibilidad permitió que rápidamente aumentara el yacimiento disponible. Con el crecimiento de los pozos productivos perforados y la liberación de restricciones, la producción dio un salto drástico. De producir cerca de 700.000 toneladas de potasio y 15.000 de litio, el Salar de Atacama llegó a producir cerca de dos millones de toneladas de potasio y 30.000 toneladas anuales de litio en los dos años siguientes.

De tener un solo depósito de cuatro kilómetros cuadrados en el núcleo del Salar en el año 2000, la compañía pasó a explorar y explotar cuatro depósitos distintos, de manera consecutiva en los últimos 20 años: Núcleo, Suroeste, Noroeste y Sureste. En los períodos *peak* de exploraciones llegaban a perforar 100.000 metros al año. Pozos que alimentan un área de pozas de evaporación que abarca 47 kilómetros cuadrados que hoy es visible desde fotos espaciales de la Tierra como un cuadradito verde turquesa que brilla en el sur del continente.

Los sistemas productivos de SQM Salar

PARTE III

La ruta de precipitación de las pozas productoras de litio

La ruta de precipitación en las pozas de evaporación solar sigue el siguiente orden: halitas – silvinitas – carnalitas de potasio – bischofita - carnalitas de litio. Este sistema tiene por objetivo producir sales de silvinita que cumplan las condiciones para alimentar las plantas concentradoras de potasio y generar salmuera de litio para la Planta de Químicos de litio El Carmen.

Paso 1 Sistemas de halita

Dado que la salmuera proveniente de estos pozos se encuentra saturada en sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) y cloruro de sodio (NaCl), el yeso y la halita son las primeras sales en precipitar en las pozas. En estos sistemas de cristalización, la halita es la especie mayoritaria en las sales precipitadas, con un bajo contenido de yeso y silvita (KCl). A pesar de que la mayor parte de la halita precipita en estos sistemas, su cristalización es constante durante todo el proceso a causa de que en todo momento la salmuera está saturada en cloruro de sodio. En esta etapa lo más importante es precipitar la mayor cantidad de halita y concentrar el potasio hasta alcanzar una saturación del 95%, que preferentemente debe precipitar en las pozas de silvinitas. En estos sistemas, el magnesio actúa como ion trazador o indicador, y debe mantenerse controlado en concentraciones menores al 1,8% dado que de otra forma se entra en el campo de precipitación de la silvinita, con contenidos de potasio en la salmuera en torno al 3,5%. Las bondades del magnesio como indicador de las fases de precipitación se potencian con las “curvas de par de iones”, que grafican la concentración del magnesio respecto a otro ion. Los cambios de pendiente en estos gráficos son señales de que ha empezado a cristalizar una sal diferente, por tanto, se debe estar atento a la gestión de traspaso de salmueras entre un sistema y otro, de tal manera de evitar la contaminación con sales no deseadas en el proceso.

Paso 2 Sistemas de silvinita

Con la precipitación de la halita y el traspaso de salmuera a sistemas más concentrados, se favorece la concentración de potasio en la salmuera y con ello el campo de precipitación de la silvita (KCl). En este escenario el (KCl) comienza a precipitar progresivamente en conjunto a la halita en lo que se conoce como sistemas de silvinita ($\text{KCl} + \text{NaCl}$). Las sales de silvinita son la materia prima para la recuperación de cloruro de potasio en las plantas concentradoras del Salar de Atacama, por tanto, se busca en la medida de lo posible que la halita no precipite en las pozas generadoras de sales a estas plantas. Los contenidos de potasio en las sales precipitadas en los sistemas de silvinitas pueden llegar hasta el 20%, mientras que la alimentación media a las plantas concentradoras se encuentra en torno al 13,5%. Al final del sistema de las silvinitas, el magnesio se ha concentrado en la salmuera a tal punto que se acrecienta el riesgo de cristalizar carnalita de potasio. Por eso es importante mantener controlado su contenido en la salmuera a niveles en torno al 4,8%.

Paso 3

Sistemas de carnalitas de potasio

El magnesio continúa su proceso de concentración en la salmuera hasta que la carnalita de potasio ($\text{KClMgC}_{12} \times 6\text{H}_2\text{O}$) comienza a precipitar cuando la salmuera se concentra lo suficiente. Esta característica convierte al magnesio en un indicador para el control y gestión de traspasos de salmuera entre los sistemas silvinitas-carnalitas de potasio, debido a que se busca evitar su precipitación en los sistemas de silvinita que alimentan a las plantas MOP. Cuando se definen los límites de magnesio como indicador en la gestión de procesos es necesario considerar las condiciones ambientales, debido a que los equilibrios asociados a este elemento son sensibles a los cambios de temperatura que pueden ser extremos en distintas estaciones del año. Además de carnalitas de potasio, y dependiendo de la ubicación de las pozas, en estos sistemas puede precipitar en menor medida NaCl , KCl , trazas de yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y bischofita ($\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$).

El sulfato es otra impureza a la cual se debe prestar atención ya que en exceso puede precipitar como sulfato de litio ($\text{Li}_2\text{SO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$), lo que se traduce en pérdidas de rendimiento de estos sistemas. Es necesario precisar que el sulfato precipita con una parte del litio y gran parte de este último se mantiene como cloruro de litio.

Las salmueras con contenidos de sulfato por sobre lo esperado son contactadas con sistemas de salmueras cálcicas, lo que mantiene los niveles de sulfato bajo

control y mantiene la operación en el campo de los cloruros. Bajo este escenario se favorece la precipitación de yeso ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$). Un indicador de calidad de las salmueras productoras de litio corresponde a la razón SO_4/Ca , que debe mantenerse en valores cercanos a 2,4, que representa la razón estequiométrica para el sulfato y el calcio de acuerdo con sus pesos moleculares.

Las sales cosechadas de carnalita de potasio pueden ser lixiviadas con agua en los reactores agitados de la Planta PC1, solubilizando un alto porcentaje del magnesio en la solución. Los sólidos filtrados de este proceso constituyen la producción de silvinita “sintética”.





Paso 4

Sistemas de bischofita

El objetivo principal de los sistemas de bischofita ($\text{MgCl}_2 \cdot x \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) es concentrar el litio en la salmuera. En esta etapa, el contenido de litio se incrementa a aproximadamente 4,0% en la salmuera con una concentración de magnesio en torno al 3,95%. El rendimiento de litio en el campo de precipitación de bischofita puede verse afectado por conceptos de impregnación en las sales cristalizadas, por lo tanto, luego de la cosecha es necesario someter estas sales a un proceso de drenaje. La etapa de drenaje o estruje consiste en disponer las sales en forma de pilas sobre una superficie levemente inclinada, las cuales cuentan en su base con una carpeta impermeable necesaria para la recuperación de salmuera. El drenaje o estruje puede verse beneficiado con el riego de soluciones sobre la pila. Dependiendo del contenido de litio en la salmuera recuperada de los estrujes, esta es reincorporada al proceso de evaporación en las pozas con concentraciones similares. Una parte de la bischofita es comercializada para su aplicación en la estabilización de caminos, así como en el control de polvo y deshielo en las mismas rutas.

Paso 5

Carnalitas de litio

Durante el proceso de concentración del litio, una de las principales impurezas la representa el magnesio, que en exceso en las pozas más concentradas genera la precipitación de carnalita de litio y, por tanto, pérdidas de rendimiento de litio. Por otra parte, el magnesio presenta inconvenientes en las etapas posteriores de purificación, lo que hace necesario su abatimiento para reducir las pérdidas de rendimiento por co-precipitación de carbonato de litio y para asegurar la capacidad de filtrado de los sólidos generados. En las pozas, una parte del magnesio es separado del litio a través de la precipitación de la carnalita de potasio, y posteriormente como bischofita. No obstante, la separación de los iones de litio y magnesio es particularmente compleja en los sistemas más concentrados, debido a que presentan un tamaño iónico muy parecido, lo que hace que su comportamiento químico sea semejante. En este contexto es que surge la importancia de la razón Mg/Li como un parámetro para la definición y control de los procesos de trasposos de salmuera y precipitación de sales. El Salar de Atacama presenta una razón Mg/Li de 6,4 en las pozas productoras de

litio, al inicio del proceso y en la última fase de evaporación, antes del despacho, se alcanza un valor de 2,22 Li/Mg , lo que en comparación a otros yacimientos favorece una operación eficiente en términos técnicos y económicos. Con el objetivo de reducir la precipitación de carnalita de litio, estas salmueras son contactadas con una solución saturada en KCl , la cual genera la precipitación de carnalita de potasio y, con ello, disminuyen los contenidos de magnesio en la salmuera concentrada de litio. Este proceso puede ser desarrollado directamente en las pozas o bien en reactores agitados. La recuperación de litio a partir de sales de carnalita de litio es posible a través de la lixiviación con salmuera menos saturada y agua de procesos. En este proceso las sales de carnalita de litio son convertidas a bischofita, en tanto el litio es solubilizado y reincorporado al sistema. La Planta PC1 ha sido empleada para la lixiviación agitada de carnalita de litio, logrando rendimientos en torno al 83%. La carnalita de litio se precipita cuando se alcanza aproximadamente el 4,40% de litio en la salmuera.

Paso 6**Salmuera concentrada**

Para el final del proceso de evaporación en las pozas del Salar de Atacama, que lleva alrededor de 18 meses, el litio se ha concentrado en la salmuera desde un 0,15%-0,20% hasta valores sobre el 5%, con contenidos de magnesio y boro de 1,4% y 0,8% respectivamente, además de concentraciones menores de calcio, sulfato, potasio y sodio. Esta salmuera es dispuesta en los reservorios de litio, que cumplen con la función de concentrar de manera final la salmuera rica en litio y servir de almacenamiento para luego ser transportada a través de camiones cisterna a la Planta de Químicos de litio El Carmen.

Li	Mg	Na	K	Ca	SO ₄	B	Cl
5,5%	1,40%	0,08%	0,02%	0,033%	0,019%	0,80%	35%

Composición química de la salmuera concentrada de litio alto en boro.

Paso 7**Cosecha de sales e impregnación**

El proceso de cristalización en las pozas genera un crecimiento continuo de las sales, aumentando el nivel de piso de las pozas, y con ello, una disminución del volumen disponible para la disposición de la salmuera. La altura máxima de precipitación puede venir definida por distintos criterios operacionales y debe ser controlada periódicamente a través de geomensura.

En el caso de las halitas, la altura máxima de las sales precipitadas estará limitada por la altura de diseño que asegure el tiempo de residencia necesario a la salmuera en el proceso de concentración. Una vez que se alcanza esta altura máxima operacional, las sales de halita deben ser extraídas de la poza y trasla-

dadas a los acopios de descarte de sales, en un proceso denominado “cosecha de sales”.

Previo a la cosecha, y para asegurar mínimas pérdidas de rendimiento por concepto de impregnación, las sales se someten a un proceso de drenaje natural, que es apoyado en primera instancia con la construcción de canales o zanjas para facilitar el drenaje y direccionar la salmuera hacia puntos estratégicos de acumulación, tales como bombas o sumideros, siendo este último un punto de succión más profundo para el traspaso de salmuera a pozas vecinas. La salmuera recuperada es traspasada a las pozas operativas que las suceden en el proceso de concentración.

Paso 8

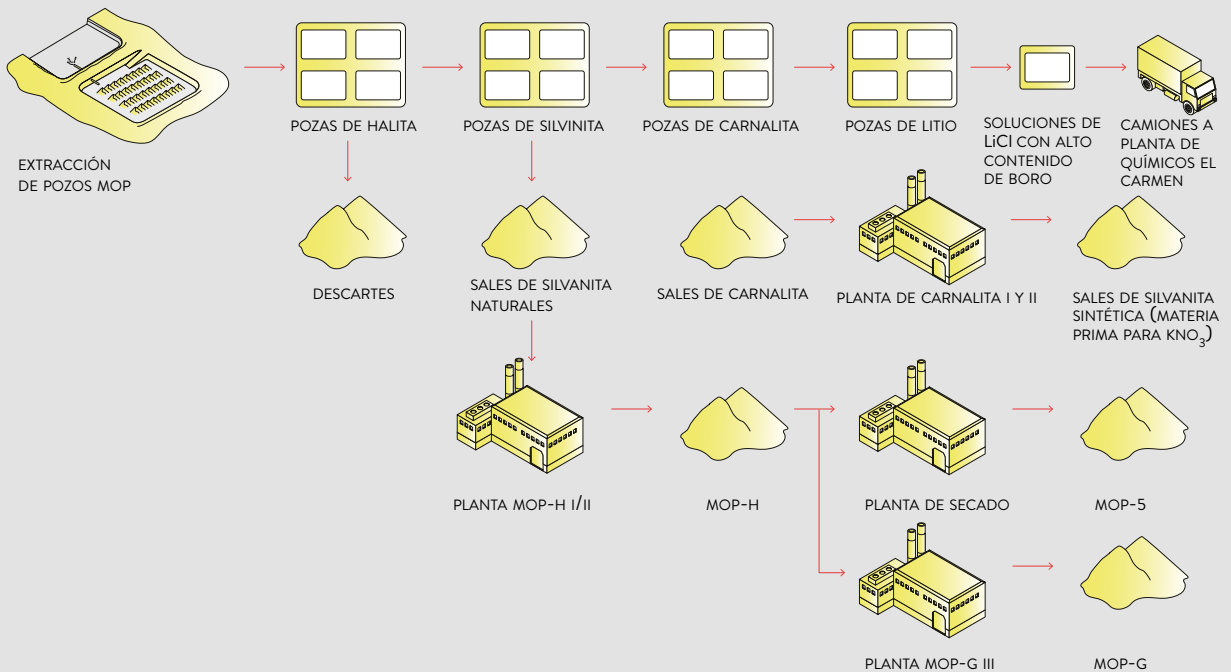
Drenaje por cordones

Un segundo proceso de drenaje es efectuado a través del desplazamiento y la disposición de las sales en la forma de cordones. Este proceso de acordonado favorece una mayor recuperación de salmuera impregnada, así como una mayor área de exposición a la radiación solar y consigue disminuir el contenido de humedad previo a la cosecha. Los niveles de impregnación residual luego del drenaje dependerán de la composición química de las sales, la distribución de tamaño, mecanismos de nucleación de los cristales, entre otros factores operacionales. La altura de los cordones dependerá de la magnitud de las sales cristalizadas durante la operación de la poza.

Una vez terminadas las etapas de drenaje y secado en cordones, se procede a realizar el muestreo y caracterización de las sales de acuerdo con estrictos protocolos de calidad. Con esta información, las sales son extraídas de la poza y trasladadas a distintos destinos según su composición química.

En las operaciones de SQM se cosechan cerca de 14 millones de m³ de sales por año, lo que equivale a 35.000 a 40.000 m³ de sales por día.

Proceso productivo SQM Salar de Atacama



PARTE IV

Paso a paso

Planta de Químicos de litio El Carmen



Paso 1

Remoción de boro

La salmuera concentrada de litio y con altos contenidos de boro es trasladada en camiones cisterna desde el Salar de Atacama hasta la Planta de Químicos de litio El Carmen, ubicada aproximadamente 25 km al este de la ciudad de Antofagasta. Esta salmuera es dispuesta en pozas de almacenamiento antes de iniciar la remoción de boro.

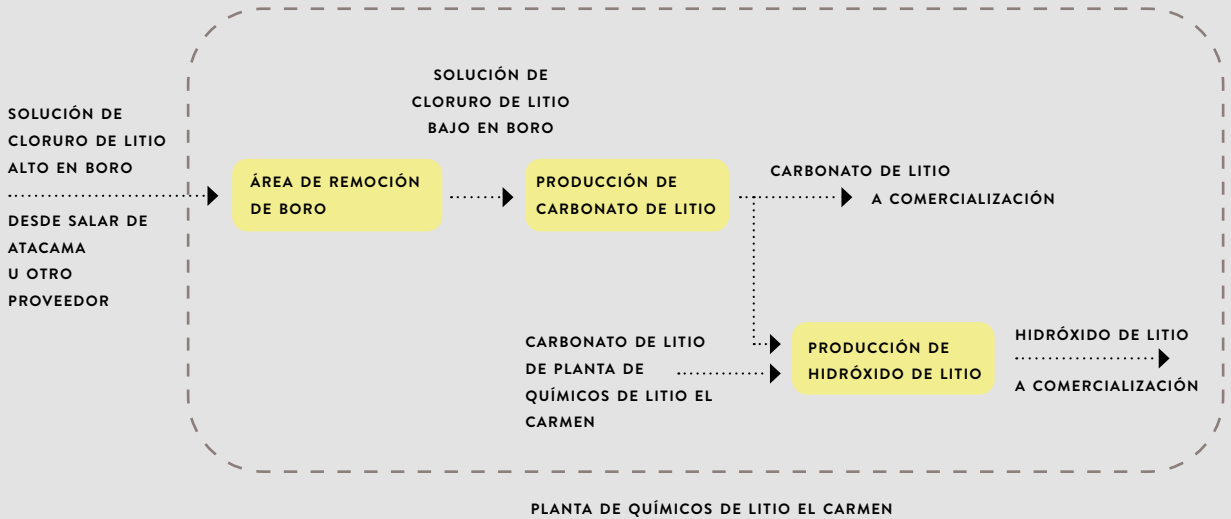
En primera instancia, la salmuera concentrada de litio con alto contenido

de boro (en torno a las 8,000 ppm) se somete a un proceso de extracción por solventes. En este proceso el boro es extraído selectivamente mediante intercambio iónico entre la fase acuosa y el reactivo orgánico. La extracción y separación se logra principalmente en función de la diferencia de densidad de ambas fases, permaneciendo de esta forma el litio en la fase acuosa concentrada. En tanto el boro es transferido a

la fase orgánica como ácido bórico. Con este proceso la solución purificada de litio ha reducido los contenidos de boro a menores a 30 ppm.

En esta etapa se produce una solución de litio bajo en boro que es la materia prima para la planta de carbonato de litio. El carbonato de litio puede ser directamente comercializado o bien, una parte puede procesarse para la producción de hidróxido de litio.

Diagrama de flujo Planta de Químicos de litio El Carmen



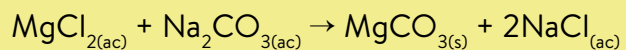
**Paso 2
Purificación**

La salmuera baja en boro debe ser sometida a un proceso de purificación en dos etapas con el objetivo de remover el magnesio y calcio presentes en la solución.

**Paso 3
Purificación para abatir el magnesio**

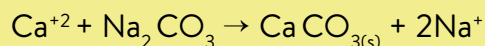
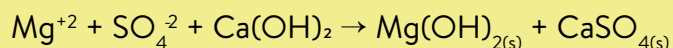
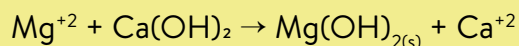
La salmuera de litio con alto contenido de magnesio es puesta en contacto con una solución de ceniza de soda en reactores agitados. La solución de ceniza de soda es previamente preparada en un estanque, donde se contacta el sólido de ceniza de soda con el disolvente. Esta solución de carbonato de sodio es bombeada y transportada a través de tuberías al reactor de esta primera fase de purificación. El carbonato de magnesio es muy poco soluble, por tanto, esta reacción permite que la mayor parte del magnesio sea abatido como carbonato de magnesio, dejando el cloruro de sodio en solución.

La recuperación de la solución resultante reducida en magnesio se realiza a través un proceso de separación sólido líquido que utiliza decantadores y posteriormente filtración. Esta solución purificada es almacenada en un estanque de acumulación, desde donde es transportada a la siguiente etapa de purificación. La pulpa rica en carbonato de magnesio es dirigida al área de tratamiento de barros, donde se procede a realizar la separación sólido líquido a través de centrifugas. De esta etapa se obtienen los RILES y RISES que son trasladados a las pozas de descarte a través de bombas y camiones respectivamente.



Paso 4**Purificación para abatir el calcio**

La solución de cloruro ya reducida en boro y magnesio pasa a una segunda etapa de purificación con el objetivo de abatir el calcio, el magnesio remanente de la etapa anterior, así como gran parte de los contenidos de sulfato. La reacción se realiza en un reactor agitado en presencia de lechada de cal y ceniza de soda, generando como productos hidróxido de magnesio y carbonato de calcio. Para la obtención de cal apagada se cuenta con una planta de cal, que consta de un silo de almacenamiento preparado para contener cal granular o en polvo, además de un sistema de control de emisiones a través de filtros de mangas. Las reacciones de esta fase de purificación son presentadas a continuación:



La pulpa resultante es enviada a equipos clarificadores, donde a través de filtros de prensa se logra separar los sólidos (hidróxido de magnesio y carbonato de calcio) de la solución clarificada de litio. Esta última es enviada a estanques de acumulación, donde es dirigida a la tercera y última etapa. Los RISES producidos desde la separación sólido líquido se envían a la etapa de tratamiento de barros descrita en la primera fase de purificación, para luego ser transportados a través de camiones a las pozas de descarte.

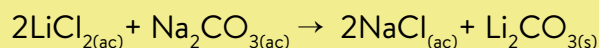
Paso 5**Carbonatación**

La etapa de carbonatación consiste en generar la reacción de precipitación de carbonato de litio a partir de la solución clarificada de la fase anterior calentada a temperaturas entre 60° y 90°C y una solución de ceniza de soda. Esta reacción se produce en una batería de reactores donde ocurre la mezcla. Debido a su baja solubilidad, el carbonato de litio precipita casi en su totalidad. Por otra parte, gracias a su solubilidad inversa, es posible aumentar la cristalización con el aumento de la temperatura.

La descarga de los reactores es enviada a una batería de hidrociclones, desde donde el *overflow* alimenta el decantador, que tiene por objetivo recuperar el licor madre de la etapa de cristalización, así como los sólidos remanentes del proceso.

El *underflow* de los hidrociclones alimenta los filtros de banda, desde donde se filtra la pulpa en caliente y luego se lava extensamente con agua caliente desmineralizada en el filtro, obteniéndose el queque de carbonato de litio húmedo. En tanto la salmuera filtrada se une con el *overflow* de los hidrociclones en el decantador de la etapa de carbonatación. El *overflow* del decantador es dirigido a un filtro de prensa donde se recupera el sólido remanente generado en el cristizador.

La reacción de precipitación del carbonato de litio se describe a continuación:



**Paso 6
Secado y compactado**

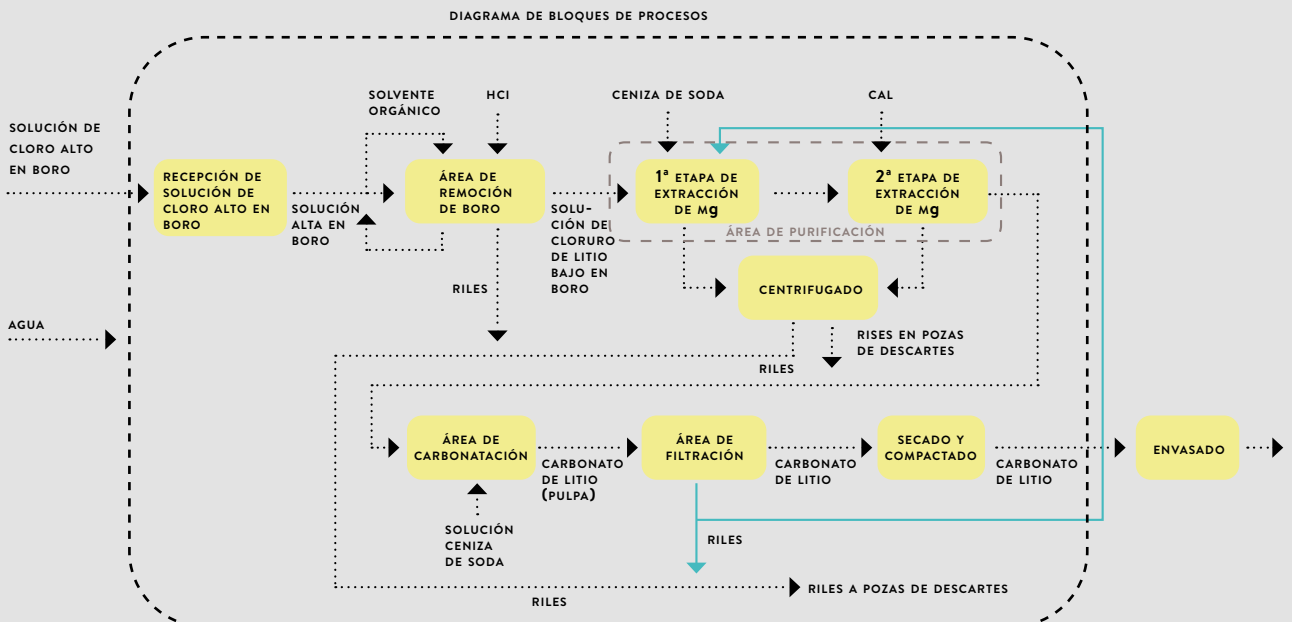
El secado del queque de carbonato de litio húmedo es realizado en un secador rotatorio dotado de una cámara de combustión a gas natural y combustible alternativo (gas natural). El producto seco es enviado al área de compactado. El material particulado generado en este proceso es controlado a través de sistemas de filtros de manga.

**Paso 7
Envasado**

El producto seco es sometido a un proceso de compactación y posteriormente disgregado en un molino de martillo. Eventualmente el carbonato de litio puede pasar a un proceso de granulación de acuerdo con los compromisos de tamaño de partícula que se tengan con los clientes. El producto se comercializa principalmente en forma de gránulos con una pureza mínima de 99,2%, existiendo el grado batería con 99,5%. El producto terminado es clasificado en harneros vibratorios y almacenado en

tolvas. Las tolvas alimentan el sistema de máquinas de envasado, donde el carbonato de litio es empacado en sacos, tambores o maxisacos según el formato dispuesto para su venta. A igual que en la etapa de secado, el material particulado es controlado mediante colectores de manga, que dirigen este material mediante tornillos alimentadores de vuelta a la línea de producción.

Diagrama de bloques de procesos Planta Carbonato de Litio SQM



PARTE V

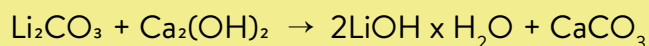
Planta de hidróxido de litio

La producción de hidróxido de litio utiliza como principal materia prima el carbonato de litio. Este proceso cuenta con varias etapas.

Paso 1

Reacción

En este proceso la pulpa de carbonato de litio es bombeada y transportada a través de tuberías a una batería de reactores, donde la pulpa es contactada con una solución de cal apagada, generándose una reacción de metástasis que produce hidróxido de litio en solución y carbonato de calcio como un sólido. Esta reacción es endotérmica, por lo tanto requiere calor para poder llevarse a cabo.



Paso 2

Clarificación y filtración

La mezcla de hidróxido de litio disuelto y los sólidos de carbonato de calcio es bombeada y transportada a un clarificador, donde se logra la separación sólido líquido con gran efectividad. Por otra parte, la solución clarificada de hidróxido de litio es filtrada para evitar contaminación con carbonato de calcio que pueda haber sido arrastrado en el proceso de clarificación. El resultado es una solución libre de residuos sólidos y que está lista para ingresar al proceso de evaporación.

Paso 3

Decantación y centrifugación

Con la finalidad de optimizar los rendimientos del proceso, la pulpa de carbonato de calcio impregnada con hidróxido de litio es sometida a un proceso de lavado en contracorriente y a otra etapa de separación sólido líquido que consta de espesadores, decantadores y centrifugas. Los residuos sólidos de carbonato de calcio con mínimos contenidos de hidróxido de litio son trasladados en camiones hacia su disposición final en la poza de descarte de sólidos habilitada para este propósito.

Paso 4
Evaporación y cristalización

En este proceso la solución de hidróxido de litio clarificada y filtrada es transportada a una serie de evaporadores, donde se produce la cristalización de hidróxido de litio monohidratado ($\text{LiOH} \times \text{H}_2\text{O}$) por la evaporación del agua presente en la solución. Se debe tener en consideración que la solubilidad de una solución de hidróxido de litio es inversa y tiene una variación poco significativa respecto a la temperatura. El diseño de los procesos de cristalización es gobernado por el comportamiento termodinámico de los componentes presentes. La cristalización es un método de separación en el que se produce la formación de un sólido (cristal o precipitado) a partir de una fase homogénea, líquida o gaseosa. La velocidad de evaporación es un parámetro importante en la cristalización por evaporación. Se ha demostrado que se logra un mayor tamaño de cristales con una tasa de evaporación más baja. Por otra parte, la velocidad de evaporación más alta de la solución saturada de hidróxido de litio induce a su vez a una velocidad de sobresaturación más alta, lo que da como resultado cristales más impuros. No obstante, la cristalización está entre los métodos más eficaces y accesibles para obtener sustancias altamente purificadas. La ordenación geométrica en el espacio de los componentes de un cristal sólido no admite sustancias extrañas disueltas como impurezas. Por esto, los componentes cristalinos de hidróxido de litio monohidratado alcanzan un alto grado de pureza.

Paso 5
Centrifugación

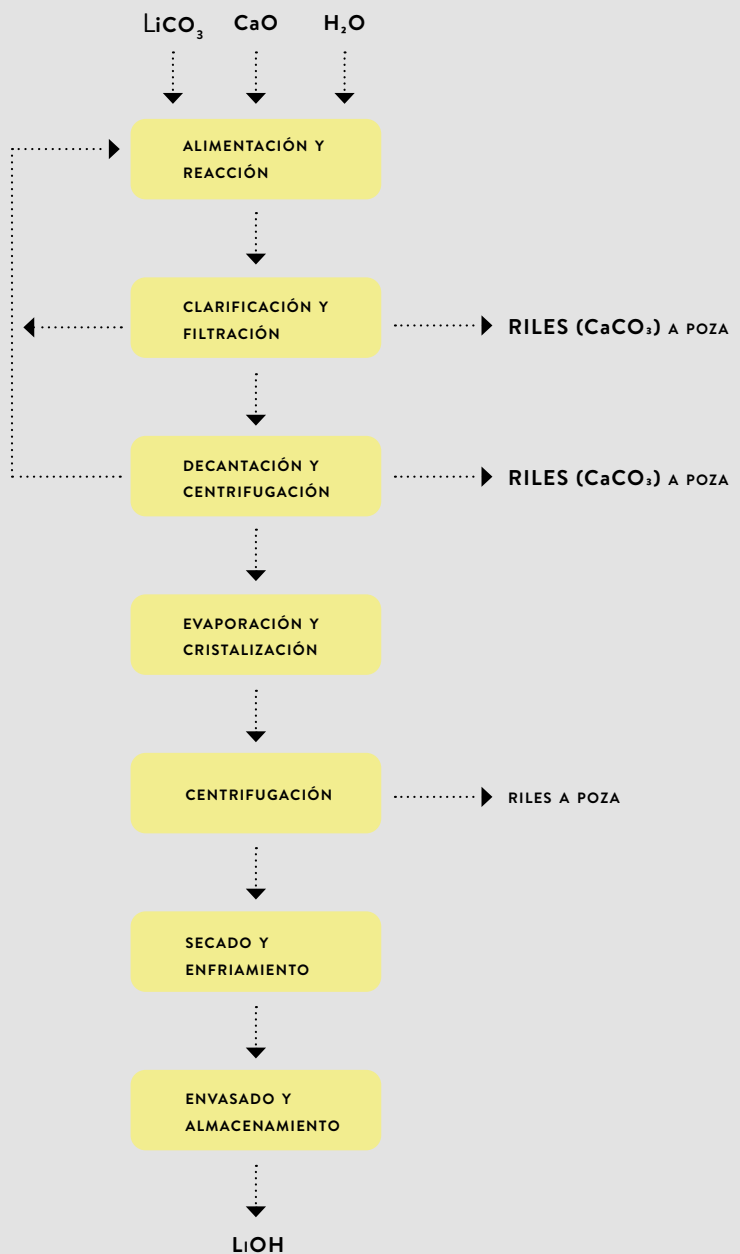
El hidróxido de litio monohidratado cristalizado de la etapa anterior es sometido a un proceso de centrifugación. Esta operación de separación de las partículas sólidas existentes en una suspensión por la acción de la fuerza centrífuga se diferencia de la sedimentación dado que en esta última solo actúa la fuerza de gravedad, por lo que la centrifugación alcanza una mayor efectividad y un menor tiempo de operación. En esta etapa de separación sólido líquido se eliminan las impurezas de cloruros y sulfatos que han permanecido en el sistema principalmente por arrastre mecánico. Una parte importante de la solución producto de la centrifugación es recirculada al último evaporador, en tanto el resto es purgado por tuberías hasta la piscina de descarte de residuos líquidos, evitando de esta forma la acumulación de impurezas en la solución de hidróxido de litio.

Paso 6
Secado y enfriamiento

Los cristales de hidróxido de litio monohidratado mantienen contenidos de humedad residual provenientes de la etapa de centrifugación. La reducción de la humedad se realiza en sistemas de secado por lecho fluidizado vibratorio, donde el material alimenta al secador desde la entrada y avanza continuamente junto con el nivel del lecho fluidizado bajo la fuerza de vibración. En tanto el aire caliente pasa a través del lecho fluidizado e intercambia calor con el hidróxido de litio húmedo, convirtiéndose en aire húmedo. Este último es expulsado después de pasar por los sistemas de colectores de polvo, mientras que el material seco se descarga automáticamente a la salida. Posteriormente el material es sometido a un proceso de enfriado. Este proceso se realiza en equipos totalmente encapsulados, para evitar toda emisión que pudiera afectar al entorno o al producto, y bajo condiciones de temperatura y humedad controladas.

Paso 7**Envasado y almacenamiento**

El hidróxido de litio monohidratado obtenido de la etapa de secado es envasado en sacos y/o tambores, de acuerdo con el formato y las especificaciones pactadas para su venta. El producto es almacenado en la bodega ubicada a un costado de la planta.

Diagrama del proceso actual de producción de hidróxido de litio



La agresiva estrategia que adoptó SQM a partir de 1997 para liderar el mercado mundial del litio –bajando el precio del carbonato de litio en más de un 60%– llevó a que varios competidores tuvieran que cerrar o paralizar sus proyectos en China, Rusia y Estados Unidos. Esta debacle que remeció a toda la industria también tuvo como víctimas a importantes productores de hidróxido de litio que no pudieron seguir operando sus plantas. El hidróxido de litio –que se produce a partir del espodumeno o del carbonato de litio– representaba a fines de los 90 alrededor de 30% del mercado mundial del litio. Era un mercado pequeño pero esencial para ciertas industrias como las de lubricantes automotrices, pinturas y baterías alcalinas, porque es químicamente más puro que el carbonato de litio. Aproximadamente el 70% de las grasas lubricantes en el mundo lo usan como insumo y de pronto el rubro se quedó sin suficientes proveedores. El plan inicial de SQM en el Salar era producir solo carbonato de litio, pero cuando los fabricantes de grasas lubricantes empezaron a pedir con urgencia hidróxido de litio, el equipo comercial de la compañía comenzó a mirar con interés ese negocio.

Ingresar a este mercado era un paso lógico porque la compañía ya producía la principal materia prima a partir de las salmueras del Salar de Atacama: el carbonato de litio. Pero construir una planta de hidróxido de litio era una inversión costosa y el proceso incluía varias etapas de reacción, filtración, cristalización y secado que debían ser cuidadosamente diseñadas y afinadas. Además, el hidróxido de litio es una sustancia corrosiva y requiere medidas de seguridad mucho más estrictas en sus plantas. Antes de arriesgarse a fabricar un producto costoso y que no conocían bien, los ejecutivos de SQM quisieron conocer mejor el mercado.

A fines de los 90 llegó una oportunidad caída del cielo para foguearse en la venta de hidróxido de litio. El gobierno de Estados Unidos mantenía hacía décadas un antiguo inventario estratégico de hidróxido de litio, porque uno de los usos potenciales del litio es para la energía nuclear. Sin embargo, en el año 2000 la posibilidad de usar el litio para fines nucleares seguía siendo más teórica que práctica. Ese año, el gobierno

norteamericano dejó de considerar estratégico este inventario y decidió venderlo. Era una cantidad considerable para ese entonces, alrededor de 10.000 toneladas de hidróxido de litio guardadas en tambores de cartón fibra, con etiquetas escritas en francés. SQM lo compró a través de una empresa intermediaria. Por los años que llevaba guardado había perdido su característica presentación de polvo blanco y cristalino. Estaba compactado y duro como roca. Fue necesario cortar los tambores para poder abrirlos, moler el contenido y volver a refinarlo para la venta. Esas 10.000 toneladas fueron el primer paso para empezar a vender embarques de hidróxido de litio al mercado internacional de las grasas lubricantes sin tener que construir una planta propia.

Paralelamente, Daniel Jiménez y otros comerciales de la empresa viajaron a China y a Rusia e hicieron acuerdos de maquila con antiguos productores de hidróxido de litio que habían quedado fuera de competencia después de la bajada de precios que provocó SQM. Es decir, SQM empezó a embarcar parte de su carbonato de litio directamente desde su planta en el Salar El Carmen a las plantas chinas y rusas. En estos países lo procesaban, lo convertían en hidróxido de litio y le enviaban esa maquila a la filial de SQM en Bélgica. Desde ahí, SQM envasaba y lo vendía a los clientes industriales en Europa.

Estas dos etapas cumplieron el objetivo inicial de crear una base de clientes. También les permitió conocer el producto y las especificaciones de calidad requeridas para cada rubro. Después de un tiempo, las ventas crecieron lo suficiente para justificar hacer una planta propia. En 2005, SQM construyó su primera planta de hidróxido de litio en el Salar El Carmen, adyacente a la planta de carbonato de litio, que la alimentaba de materia prima. Fue un hito doble para la industria mundial del litio porque se trató de la primera planta de hidróxido de litio en Latinoamérica y con la mayor capacidad productiva que existía hasta ese momento en el mundo, con 6.000 toneladas anuales.

El mismo año en que la planta de hidróxido de litio empezó a producir, los comerciales de SQM Salar notaron un cambio de marea en el mercado: un nuevo tipo de cliente más exigente, que no requería cantidades mucho mayores de carbonato o de hidróxido de litio, pero que estaba dispuesto a pagar precios muy elevados por obtener un producto con menos contaminantes y especificaciones de calidad inusitadas para un *commodity* industrial. Era el emergente y explosivo mercado de las baterías, que impulsaría la demanda de litio a niveles impensados hasta entonces. Tan acelerado fue el boom que la flamante –y gigantesca para ese entonces– planta de hidróxido de litio muy pronto les quedó chica. En 2016 fue necesario ampliar su capacidad de 6.000 a 13.500 toneladas anuales. En SQM aún no imaginaban que estaban viviendo las primeras señales de una revolución tecnológica que en pocos años dispararía la fiebre mundial del litio.



En 2005 apareció un nuevo tipo de cliente. Más exigente, pero dispuesto a pagar precios muy elevados por obtener un producto con menos contaminantes y especificaciones de calidad inusitadas para un *commodity* industrial. Era el emergente mercado de las baterías, que pronto impulsaría la demanda de litio a niveles explosivos.

Los primeros clientes para baterías en japon

Cuando SQM comenzó a comercializar litio en 1996, los celulares recién se estaban masificando y la gran mayoría tenían baterías de níquel-metal. El uso comercial del litio para las baterías aún no se avizoraba en Chile ni en el mundo.

Fue en Japón donde se incubó ese gran salto tecnológico.

En 1991 la compañía japonesa Sony presentó una filmadora con una batería recargable de iones de litio, más pequeña, liviana y con mayor capacidad que sus antecesoras de plomo y níquel-hiduro. El litio resultó ser el metal ideal para las baterías de objetos pequeños, porque es un mineral extremadamente liviano y tiene una alta densidad de energía. Es decir, permite almacenar mucha energía en volúmenes diminutos. Cuando se combina con metales como el magnesio o el aluminio, forma aleaciones muy resistentes. Es el sólido que posee la mayor capacidad calórica conocida y tiene un potencial electroquímico muy elevado. Estas baterías fueron tremendamente atractivas para el mercado de los dispositivos móviles que empezó a emerger en los 90, como celulares, *laptops* y *tablets*. Los primeros computadores portátiles usaban baterías de níquel-cadmio, pero como el cadmio era peligroso por su toxicidad, lo cambiaron por baterías de níquel-metal, en base a hidruros metálicos de níquel. Con la invención de Sony, las baterías de níquel-metal en los computadores portátiles fueron reemplazadas por baterías recargables que usaban pequeñas cantidades de litio. En poco tiempo esta tecnología se masificó también en los celulares.

SQM tuvo una interacción muy activa con los desarrolladores de estas tecnologías desde sus etapas germinales ya que para poder producir los cátodos y materiales de estas prometedoras baterías nuevas necesitaban litio. Pero no cualquier litio.

La primera empresa japonesa en aproximarse a la filial de SQM en Tokio a fines de los 90 fue Sony, que había inventado la batería basada en cátodos de óxido de litio cobalto y requería carbonato de litio para esta nueva aplicación tecnológica.

Entusiasmados ante este nuevo mercado que se abría, los ejecutivos comerciales de SQM viajaron a Japón y le ofrecieron a Sony su mejor carbonato de litio para usos industriales, que era el mismo que vendía la empresa a los rubros de cerámicas, aluminios y vidrios especiales. Pero en Sony les dijeron que no. Ese carbonato de litio no les servía para las baterías. “¿Cuáles son las especificaciones que necesitan entonces?”, les preguntaron los comerciales chilenos. Los japoneses respondieron: “No estamos seguros, pero vamos probando”.

Como la tecnología de baterías para aparatos electrónicos pequeños estaba recién despegando, los productores no sabían cuál era la especificación de carbonato de litio que se requería para que las baterías funcionaran en perfectas condiciones. Comenzó un trabajo de investigación conjunto entre el cliente y el área de procesos de SQM, que tomó incontables pruebas en la planta de El Carmen hasta encontrar la pureza química que mejor funcionaba. Los ingenieros y químicos de SQM Salar despachaban muestras a Japón y los técnicos de Sony las probaban y pedían ajustes para ir reduciendo el contenido de sodio, de calcio, de partículas magnéticas y otros contaminantes, aunque estuvieran presentes en cantidades minúsculas. Aun así podían dañar el delicado producto final.

Comenzó un trabajo de investigación conjunto entre el cliente y el área de procesos de SQM, que tomó incontables pruebas en la planta de El Carmen hasta encontrar la pureza química que mejor funcionaba.



Para atender la demanda del nuevo mercado de baterías, la empresa invirtió en rediseñar las plantas para crear distintas calidades de litio y aprobó planes para aumentar la capacidad productiva de la planta de carbonato de litio de 30.000 a 40.000 toneladas, y la de hidróxido de litio de 6.000 a 13.500 toneladas anuales.



Al cabo de un tiempo los japoneses se dieron cuenta de que además de los componentes químicos también eran importantes las características físicas del producto: el tamaño de las partículas de carbonato de litio necesitaba pasar del porte de un grano de azúcar a un polvo tan fino como la harina o el talco. Para cumplir esta exigencia los procesistas de SQM Salar introdujeron en la planta de carbonato de litio unos molinos especiales para reducir el tamaño de las partículas a un producto micronizado, es decir, inferior a 10 micras o a 0,01 milímetros. Incluso el tamaño y material del envasado fue rediseñado y rigurosamente evaluado por los japoneses para evitar daños al producto. El equipo técnico y comercial de SQM viajaba continuamente a Japón para hacer seguimiento a las pruebas. Tardaron cuatro años en lograr el nivel de calidad requerido para venderle la primera partida de carbonato de litio micronizado y de alta pureza a Sony.

Durante ese mismo período SQM ofreció carbonato de litio a otras empresas japonesas que producían cátodos para baterías y se enfrentaron a procesos de calificación que resultaron tanto o más exigentes que el de Sony. El primer acercamiento partía por enviar al cliente una bolsita con unos pocos cientos de gramos de litio para analizar en el laboratorio. En esta etapa, el cliente podía especificar ciertos requerimientos, como bajar los niveles de sodio o de magnesio. En la planta de El Carmen ajustaban los procesos y la receta para cumplir con esas exigencias y luego se enviaba una muestra más grande, de algunos kilos, para que el cliente probara el producto. Con ese litio se hacía un cátodo de verdad y se medía el desempeño de ese cátodo en una batería real: su carga, descarga, estabilidad, seguridad, entre otras características. Podía tomar meses o incluso años de experimentación conjunta para adaptar el producto a las medidas de las necesidades del cliente y hacerlo utilizable para esa industria.

La primera empresa en aprobar un producto de grado industrial mejorado de SQM para el mercado de las baterías fue Seimi, en Japón, que fue líder en el desarrollo de material de cátodos para baterías. Desde entonces SQM ha vendido carbonato de litio grado batería a otros grandes fabricantes en Japón, Corea y Estados Unidos que también comenzaron

a producir cátodos y baterías de óxido de litio cobalto. Se juntó la masificación explosiva que tuvieron los celulares en la década del 2000 con la victoria tecnológica que lograron las baterías de óxido de litio cobalto contra el níquel-metal.

En esa etapa SQM llegó a vender 35 productos de carbonato de litio e hidróxido de litio grado batería, con especificaciones distintas para cada cliente. Al ser una tecnología nueva, desarrollada por decenas de actores distintos y con diferentes aleaciones metálicas, no existía ni existe todavía una receta única, sino que cada cliente requería su litio a la medida, *tailor made*, para cada uno de los fabricantes que competían en esta frenética carrera tecnológica. Algunos fabricantes toleraban niveles más altos de sodio, pero las partículas magnéticas afectaban a sus baterías. Otros pedían bajar los niveles de cobre; otros, los del silicio. Cada especificación era investigada codo a codo con el cliente bajo estrictas condiciones de confidencialidad.

Los productores de baterías estaban en un desarrollo muy acelerado, probando distintas aleaciones y exigían a sus proveedores tener la misma flexibilidad. Por la misma competencia e investigación constante de la tecnología para baterías, los requerimientos iban cambiando y ni siquiera los mismos clientes sabían muy bien lo que iban a necesitar a futuro, o cuál tecnología para baterías iba a despegar en un momento dado. Muchas veces ocurría que alguna impureza que ni siquiera sabían que existía en su litio, de repente, de un día para otro, pasaba a ser absolutamente relevante. Y como eran tan indetectables, los químicos e ingenieros de SQM tenían que trabajar en conjunto con los clientes para desarrollar métodos de análisis y medición para eliminar esas partículas indeseadas.

Para ganar nuevos clientes en el exigente mercado de las baterías, la empresa estuvo dispuesta a cumplir con exigencias que parecían insólitas para un *commodity* industrial. Esto aventajó a SQM sobre sus competidores, que no contaban con la ductibilidad ni los bajos costos del sistema productivo desarrollado en el Salar de Atacama. Para estar a tono con las demandas de este mercado la empresa invirtió en mejorar los procesos y

los rendimientos de las pozas de evaporación, rediseñar las plantas para crear distintas calidades de litio y aprobó planes para aumentar la capacidad productiva de la planta de carbonato de litio de 30.000 a 40.000 toneladas y la de hidróxido de litio de 6.000 a 13.500 toneladas anuales, porque se proyectaba que las baterías a base de litio llegarían en cinco años a un 30% de los teléfonos móviles. No imaginaban que la realidad superaría con creces las proyecciones: en menos de cinco años la tecnología en base a litio saltaría al 99% de los celulares en el mundo.

Sin embargo, justo antes de que ocurriera el despegue exponencial de los *smartphones*, vino la crisis financiera mundial de 2008. La industria del litio, al igual que muchas otras, se paralizó. Hasta entonces SQM venía como avión, produciendo alrededor de 30.000 toneladas anuales de carbonato de litio y ese año se vendieron solo 15.000. Fue un duro golpe para la compañía porque se desplomó el mercado del litio, de las tecnologías móviles, de las energías limpias, de los autos eléctricos y de todos esos desarrollos en los que había apostado crecer con fuerza.

SQM pasaba por una encrucijada angustiante. Ante el derrumbe de las ventas no podían mantener la producción en alto, porque el litio es un mineral que no se puede dejar guardado por tiempos prolongados porque afecta sus propiedades físicas y/o químicas. Las ventas habían bajado a la mitad, pero si reducían la producción también a la mitad y desvinculaban a una parte de la gente, corrían el riesgo de que experimentados trabajadores y profesionales se incorporaran a la competencia y, una vez que el mercado se recuperara, ya no tendrían con quiénes operar la planta.

Varios de sus competidores, doblegados por la crisis, optaron por reducir costos. La plana ejecutiva de SQM Salar defendió ante el directorio la opción contraria: proyectaron que el litio volvería a subir su demanda y que lo más sano económicamente era mantener los planes de producción y al equipo intactos. Fue una decisión salvadora, porque la crisis pasó y el litio volvió a subir su demanda y su precio a un ritmo imparable. En 2010 explotó el desarrollo de baterías de ion litio para computadores, celulares y *smartphones*, que se convirtió en la tecnología dominante en los dispositi-

Durante la crisis mundial de 2008, la plana ejecutiva de SQM Salar defendió ante el directorio su proyección: volvería a aumentar la demanda de litio y lo más sano era mantener los planes de producción y el equipo intactos. Fue una decisión salvadora, porque la crisis pasó y el litio volvió a subir su demanda y su precio a un ritmo imparable.

tivos móviles. Empresas como LG en Corea; Panasonic y Sony en Japón, y Nokia en Finlandia hicieron crecer aceleradamente la demanda de litio. En 2012 Tesla sacó al mercado su icónico Model S, el primer automóvil totalmente eléctrico producido en masa, que hizo despegar la exploración de baterías para el emergente mercado de la electromovilidad. Al haber apostado por el crecimiento en el momento preciso, SQM fue la única que logró proveer a tiempo. El sistema de pozas de evaporación ya estaba preparado para la mayor demanda, las plantas de carbonato y de hidróxido de litio se estaban ampliando y solo tuvieron que seguir bombeando salmuera a toda máquina.

En el Salar fueron tiempos de euforia, pero también de mucho estrés. La demanda era tan frenética que apenas daban abasto. En ocasiones se mandaba un despacho de litio por avión, para poder cumplir a tiempo a algún cliente. O si un productor necesitaba de manera urgente un producto, se le despachaba el embarque de otro fabricante que podía esperar más. La gente de ventas sufría con esas decisiones de último minuto, pero esa flexibilidad les permitía llegar a tiempo en los períodos más frenéticos.

La demanda del litio para el mercado de las baterías creció exponencialmente, y el precio subió hasta que a mediados de la década de 2000 superó el nivel previo de la entrada de SQM al mundo del litio: 4.000 dólares la tonelada. Desde entonces, el precio ha alcanzado hasta 15 veces esa cifra. SQM acompañó ese crecimiento porque tuvo la visión de ampliar sus plantas, ser flexible y mejorar sus procesos para producir un litio de alta pureza y calidad a partir de las salmueras del desierto de Atacama.



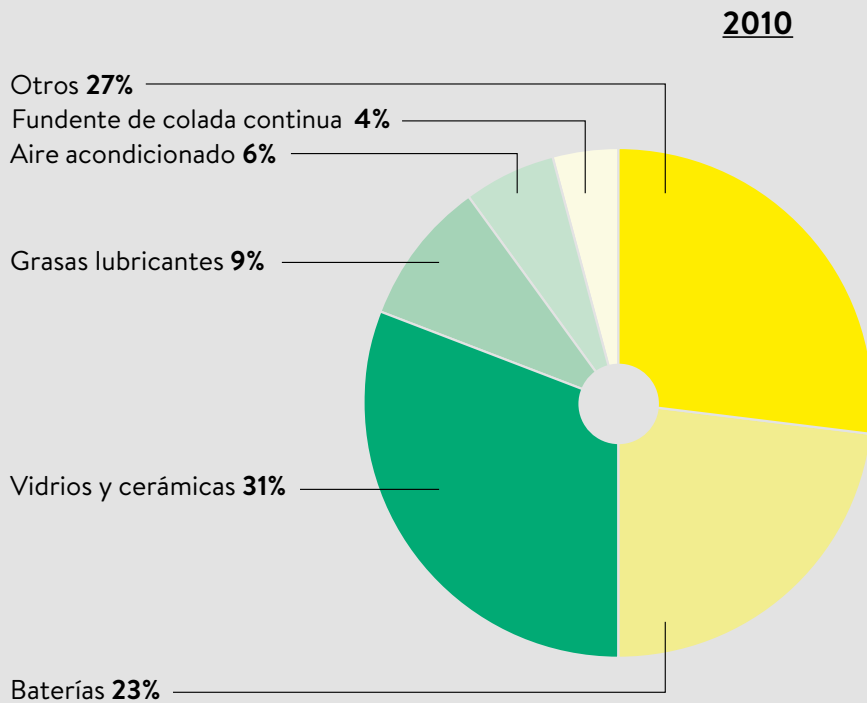


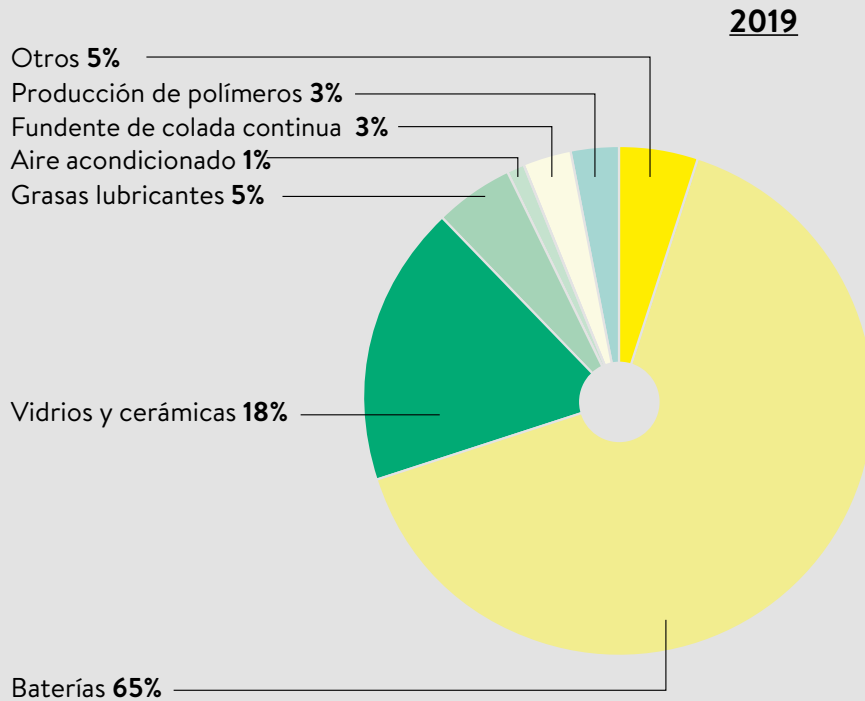
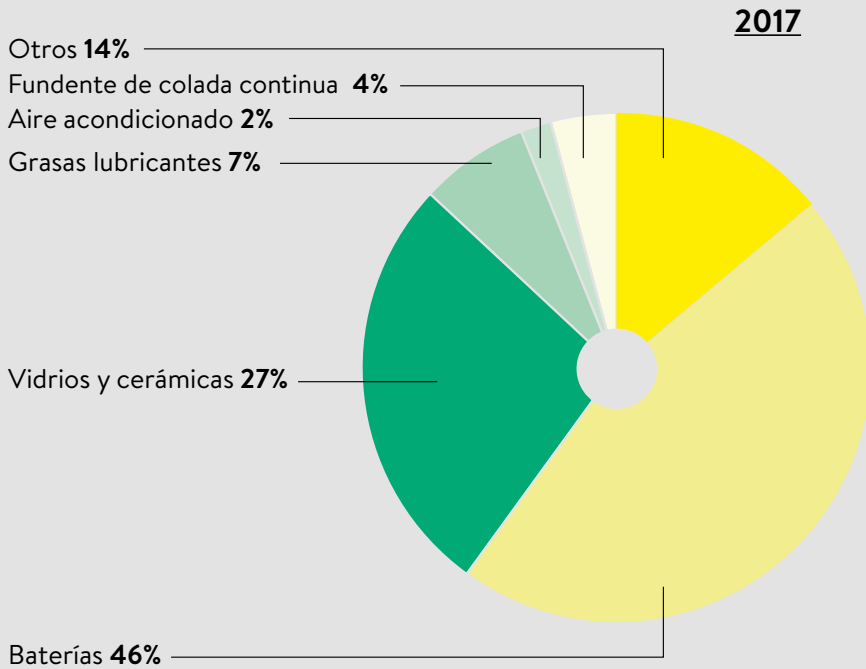
Aplicaciones industriales del litio

El litio exhibe propiedades que lo hacen atractivo para diversos usos como vidrios y cerámicas, grasas lubricantes, aire acondicionado y otros rubros industriales. En la última década ha crecido significativamente el consumo de litio para las baterías, con una demanda para este fin

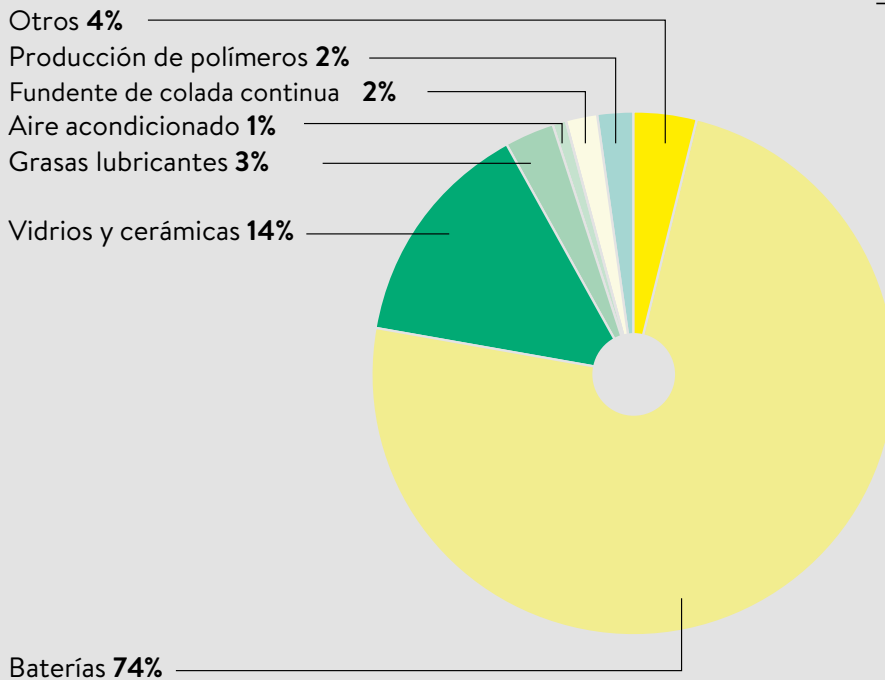
que se triplicó desde 2010 a 2019. Esto se debe al incremento considerable en el consumo de tecnología de punta en el mundo y la promoción del uso de tecnologías limpias, como vehículos eléctricos y paneles solares.

Demanda mundial de litio para sus diversos usos en los años 2010, 2017 y 2019.





2021



VIDRIOS Y CERÁMICOS

Es uno de los principales usos industriales del litio. Los beneficios que aporta este metal a la fabricación de vidrios y cerámicos son los siguientes:

- 1) Reduce la expansión térmica**
Las placas de vitrocerámica son el mejor ejemplo de esto. El litio mantiene la moldura en su lugar. Como resultado, no hay resistencia térmica o expansión.
- 2) Aumenta la fuerza del molde**
El litio aumenta la resistencia del cuerpo cerámico, lo que mejora la durabilidad.
- 3) Asegura la consistencia del color**
Cuando se aplica a mezclas como el cemento, el litio reduce el cambio de color. Sin ella, los colores cerámicos base influyen en la coloración.

- 4) Mejora la durabilidad**
El litio es una razón importante por la cual las ventanas no se arruinan bajo presión. Las ventanas normales tienen doble acristalamiento, con dos paneles de vidrio separados por un espacio de aire. Esto ayuda con el aislamiento y la insonorización. Sin embargo, las ventanas más eficientes usan litio. Una fina capa del metal más ligero de la tierra mantiene los interiores cálidos en invierno y frescos en verano.

- 5) Aumenta la velocidad de fusión y disminuye la viscosidad**
El litio reduce drásticamente las tasas de corrosión. También asegura que el vidrio se erosione lentamente. Al convertirse en un óxido mientras se calienta, el litio mejora las propiedades físicas de las ventanas.

CERÁMICOS DENTALES

En el área de la odontología, el disilicato de litio (Li₂SiO₃) es ampliamente utilizado en la restauración dental, especialmente para la construcción de coronas, puentes y carillas, debido a que su color es muy similar al del diente natural y a sus excelentes propiedades mecánicas. La introducción de la vitrocerámica en la industria odontológica ha permitido grandes avances en el desarrollo de materiales que igualan o incluso superan las propiedades ópticas, mecánicas y químicas de los dientes naturales.

ALUMINIO

Para la obtención de metal de aluminio, se utiliza principalmente el proceso Hall-Heroult, que consiste en una electrólisis de la alúmina fundida (Al_2O_3) en un baño de composición de entre 2 y 8% de la misma, entre 5 y 7% de fluoruro de aluminio, entre 5 y 7% de fluoruro de calcio y 80 a 85% de criolita ($\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$). Al baño fundido se le agrega un 3,5% en peso de carbonato de litio (Li_2CO_3)

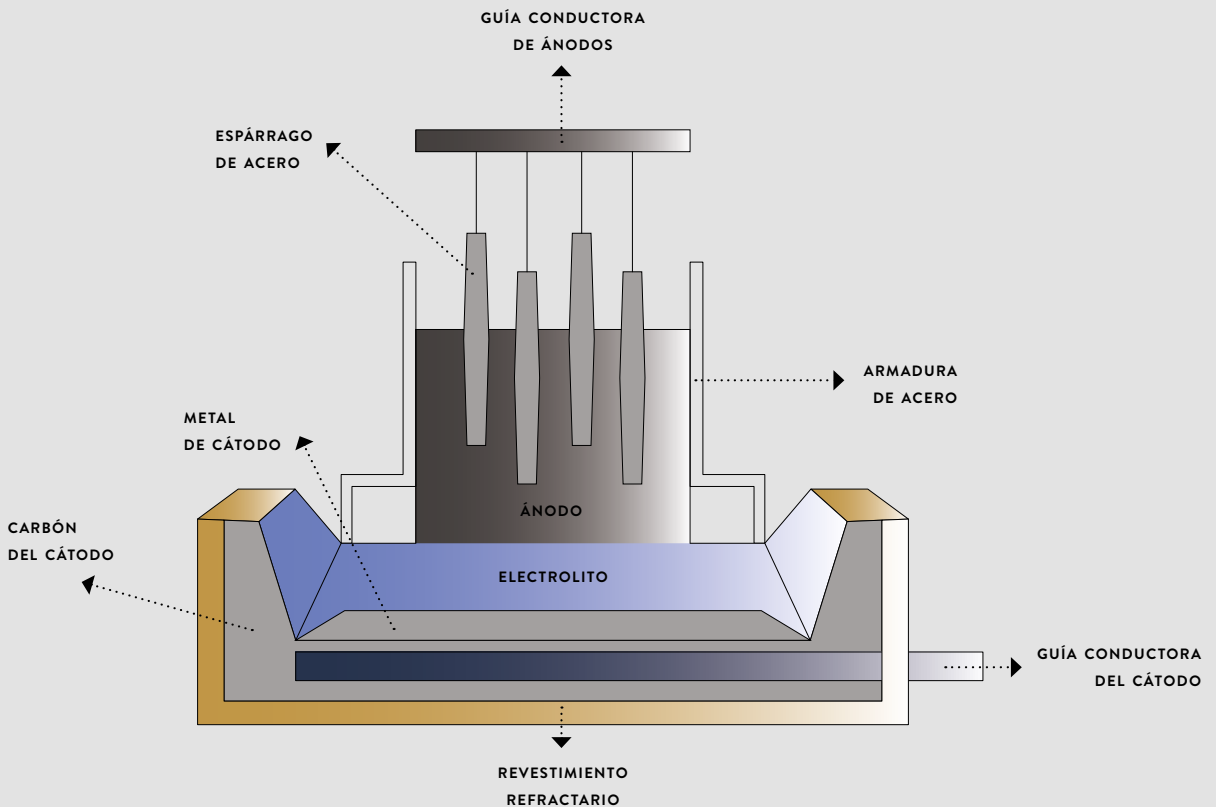
en gránulos con respecto al peso del electrolito. Se agrega aproximadamente 2 kg de carbonato de litio por tonelada de aluminio producido. Este proceso permite los siguientes beneficios:

- Disminuye el punto de fusión del baño, como la viscosidad.
- Aumenta la conductividad eléctrica del electrolito fundido.
- Disminuye el consumo de los ánodos

de carbón y criolita, y gracias a esto disminuye entre un 20 y 30% la emisión de flúor al ambiente, bajando la contaminación.

Estos cambios que genera el incorporar Li_2CO_3 , permiten trabajar a temperaturas más bajas en el proceso y así disminuir el consumo de energía y mejorar la eficiencia eléctrica de corriente, lo que a su vez aumenta la productividad.

Celda de producción de aluminio con ánodo autohorneado.



ALEACIONES ALUMINIO-LITIO

El trabajo sobre las adiciones de Li a Al se informó a principios de la década de 1920, pero no fue hasta 1945 cuando I. M. Le Baron de la compañía Alcoa patentó las primeras composiciones de Al-Li-Cu. (Dorin et al., 2018; Le Baron, 1945). La primera aplicación del avión de aleaciones de Al-Li fue en forma de placa 2020 en 1958, utilizada en las alas del avión Vigilante RA-5C de la Armada de Estados Unidos. Posteriormente, en los años 70, debido a la crisis del petróleo se consideró estudiar con mayor profundidad estas aleaciones, y en 1983 dos grandes compañías, Alcan y Alcoa, anunciaron la producción industrial masiva de este tipo de aleaciones.

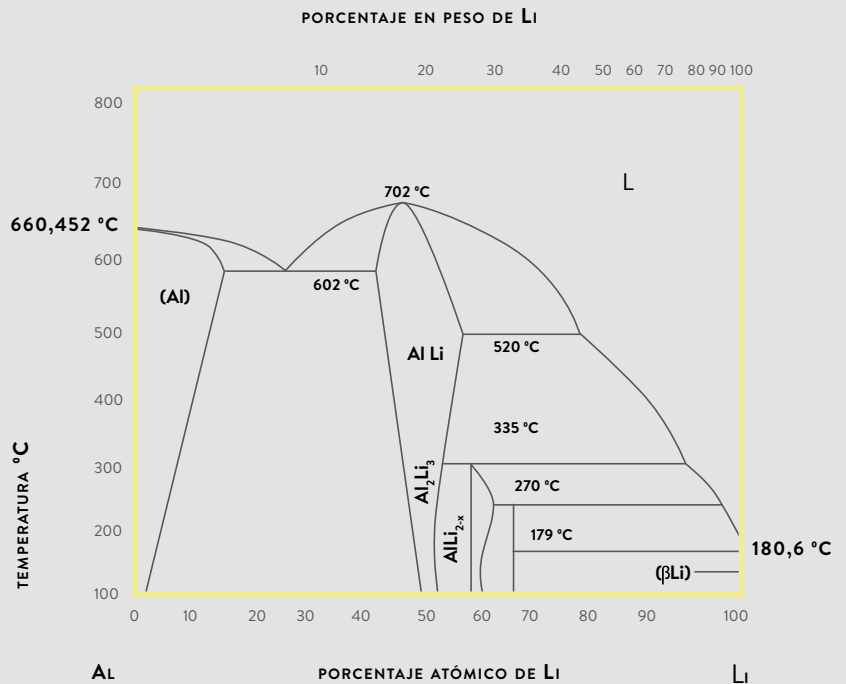
Dado que el litio es el metal elemental más ligero en el planeta (0,53 g/cm³), mucho menos que el aluminio (2,7 g/cm³), esto resulta en aleaciones significativamente menos densas que el aluminio (las aleaciones comerciales de Al-Li contienen hasta 2,45% en masa de litio).

Razones técnicas para la adición de litio en aleaciones de aluminio:

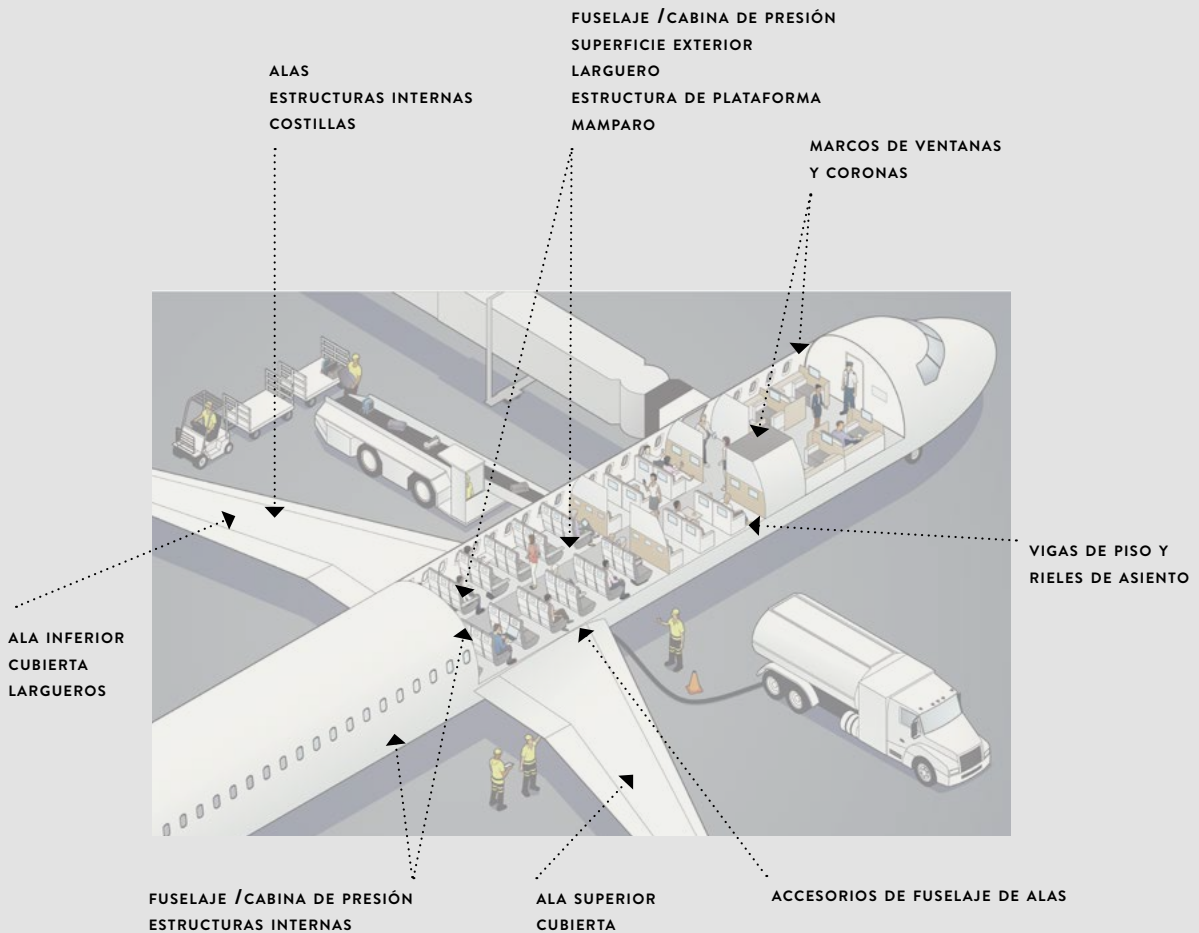
- La adición de 1% en peso de Li proporciona una disminución de densidad de aproximadamente 3%.
- La adición de 1% en peso de Li proporciona un aumento de aproximadamente 6% en el módulo elástico de Young.
- Las adiciones de Li permiten la formación de potentes precipitados de endurecimiento.
- Las adiciones de Li imparten una mayor resistencia al crecimiento de grietas por fatiga.

A pesar de que un diagrama de fases binario de aluminio-litio es relativamente sencillo, este se vuelve bastante más complejo al añadir otros elementos como cobre, magnesio o circonio. Las diferentes cantidades en que se adicionen estos otros elementos varían la precipitación de fases que sucede al enfriar la aleación, lo cual modifica sustancialmente la estructura y sus propiedades mecánicas finales, llegando incluso a determinar la necesidad de un tratamiento térmico u otro.

Diagrama de fases del sistema aluminio-litio.



Aleaciones aluminio-litio en aviones.

**ALEACIONES ALUMINIO-LITIO**

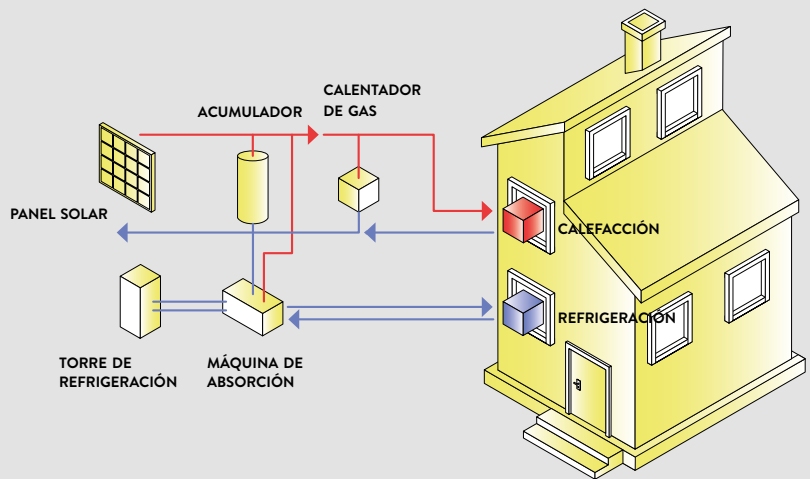
En la industria aeroespacial de varios países se ha considerado el uso de las aleaciones Al-Li en piezas del ala y fuselaje para diferentes tipos de aviones. La utilización de este material permite reducir el peso de los aviones en más del 10%. Las aleaciones con un 2 a 3% en litio resultan atractivas para esta industria a causa de su reducida densidad y mayor resistencia a la corrosión. Sin embargo, tienen un costo de producción relativamente alto por lo que los fabricantes de aviones comerciales han optado por aleaciones tradicionales con compuestos de boro, grafito y fibras poliméricas en lugar de aleaciones aluminio-litio. La única notable excepción para el uso de estas aleaciones es para la exploración espacial, en tanques de combustible criogénicos. A causa de la escasez de combustible y la alta demanda, el uso de aleaciones aluminio-litio ha ido en aumento en la industria aeroespacial.

LUBRICANTES

Entre los años 1940 y 1950, se comenzó a incorporar el uso de jabones de litio en las grasas lubricantes. Hoy, el 80% de aditivos jabonosos para grasas utilizan base de litio. Los dos jabones de litio más comunes son el estearato de litio y el 12-hidroxiestearato de litio. Este último es el más usado dentro de la producción mundial de grasas fabricadas con jabones de litio debido a que tienen mejores cualidades como espesante por la capacidad del anión 12-hidroxi-esteárico para formar puentes de hidrógeno.

AIRE ACONDICIONADO

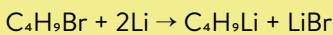
El bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O) y el agua-amoniaco (H₂O-NH₃) son los dos pares de refrigerante-absorbente más utilizados en el sistema de absorción de vapor en los sistemas de aire acondicionado. En el par de bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O), el agua es un refrigerante y la solución de bromuro de litio es un absorbente; mientras que en el caso del par de agua-amoniaco (H₂O-NH₃), el agua es un absorbente y el amoníaco actúa como refrigerante. El H₂O-NH₃ generalmente se usa para almacenamiento en frío a gran escala, mientras que LiBr-H₂O se usa para la aplicación de aire acondicionado.



Esquema de funcionamiento de refrigeración en una casa.

POLÍMEROS

A mediados de la década de 1950 se produjeron importantes avances en la tecnología de los catalizadores que condujeron al desarrollo de versiones mejoradas de polibutadieno, donde se descubrió que el n-butil-litio es particularmente útil para este tipo de procedimientos sintéticos. Según el catalizador utilizado en su producción se pueden obtener diferentes tipos de polibutadieno, cada uno con propiedades específicas. La fabricación del n-butil-litio es relativamente sencilla, ya que se puede obtener de forma directa mediante la reacción de cloruro o bromuro de butilo y litio metálico, trabajando en algún solvente orgánico como benceno, ciclohexano o dietil-éter. Estas reacciones se utilizan para la síntesis de poliisopreno, polibutadieno y copolímeros butadieno-estirolo, polímeros que han alcanzado una importancia central en el mercado de los plásticos y de las gomas sintéticas.



SALUD MENTAL

El litio es la terapia a largo plazo más efectiva para el trastorno bipolar. Protege contra la depresión y la manía, y reduce el riesgo de suicidio. A partir de 1949 John Cade descubrió que este recurso tiene una acción antimaniaca. En la década de los 50 comenzó su uso en Europa como antimaniaco y antirrecurrencial en la enfermedad maniaco depresiva. En 1970, Estados Unidos aprobó su uso en tratamiento de la manía aguda. A partir de esa década la demanda por este medicamento fue en aumento y en Chile también se autorizó su comercialización.

La mayor parte de la evidencia de su eficacia proviene de ensayos controlados aleatorios de antipsicóticos atípicos en los que el litio era un comparador activo. Su uso está limitado por su estrecha ventana terapéutica, efectos adversos y toxicidad en sobredosis. El litio se asocia con insuficiencia renal en un número pequeño pero significativo de personas. El riesgo de disminución de la función renal es mayor en mujeres más jóvenes y en aquellas con mayores concentraciones de litio en suero. El metabolismo de tiroides, paratiroides y calcio puede verse afectado y debe controlarse, tanto antes como durante el tratamiento. En el embarazo, existe un posible riesgo de malformaciones cardíacas fetales. La decisión de retirar el litio durante el embarazo debe considerar tanto el riesgo para el feto como el riesgo de recaída en la madre. Según indica el doctor Pedro Retamal, perteneciente a la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile, con el pasar de los años, el concepto de enfermedad

bipolar ha sido refinado y los límites del diagnóstico se han expandido, incluyendo los trastornos bipolares tipo I, tipo II (y tal vez el tipo III), cicladores rápidos, episodios mixtos y ciclotimia. La prevalencia es algo más del 1% de la población adulta. Además de esta significativa morbilidad y sus consecuencias, puede ser una enfermedad mortal: aproximadamente el 19% de los pacientes bipolares llegan a suicidarse.

Afortunadamente, el uso de litio produce una reducción en seis veces esta frecuencia y en el seguimiento de pacientes tratados con litio es posible evitar tanto los suicidios como los intentos.

En concordancia con lo mencionado por el Dr. Retamal, en la Universidad de Oxford reportan que, para casos de manía aguda, la evidencia actual favorece el uso de medicamentos antipsicóticos en el tratamiento inicial de la manía. Para este propósito, los medicamentos antipsicóticos son superiores al litio o la carbamazepina. La risperidona, la olanzapina y el haloperidol tienen la mejor eficacia y tolerabilidad. En resumen, como antidepresivo, el litio parece ser eficaz en los pacientes con episodios depresivos que son muy frecuentes (se piensa que podrían corresponder al espectro bipolar por su recurrencia), y como potenciador de respuesta para distintos antidepresivos en pacientes con depresión resistente. Sin embargo, su uso inadecuado e indiscriminado, puede causar riesgos importantes en los pacientes. Por lo tanto, el litio sigue siendo una medicina importante y útil que, cuando se usa con atención experta, beneficia a muchos pacientes.

ENERGÍA NUCLEAR

La energía de origen nuclear puede ser de dos tipos: fusión nuclear y fisión nuclear. Tanto la fisión como la fusión nuclear son reacciones que liberan la energía almacenada en el núcleo de un átomo. Pero hay importantes diferencias entre ambas. La fisión nuclear es la separación de un núcleo pesado en núcleos más pequeños, mientras que la fusión nuclear es la combinación de núcleos ligeros para crear uno más grande y pesado.

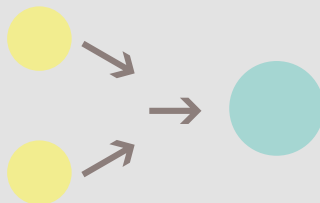
La fisión nuclear tiene la desventaja de ser de difícil control y genera una gran cantidad de residuos. Es decir, es peligrosa. Por otra parte, la fusión nuclear es una técnica para obtener energía mucho más limpia, es más controlable y no tiene prácticamente ningún residuo peligroso, por lo cual, aparentemente es la energía del futuro. Las considerables dificultades científicas y técnicas (aunque muchas superadas) han provocado que esta tecnología aún se encuentre en fase de investigación y que no se haya conseguido producir el proceso de manera autosostenida en condiciones controladas. No obstante, esta tecnología podría cubrir completamente la demanda de la humanidad de manera sostenible y la investigación se ha intensificado en los últimos 20 años.

Actualmente la alternativa con mejor potencial es la fusión nuclear de deuterio-tritio (D-T). El deuterio es un isótopo estable de hidrógeno y se puede extraer fácilmente del agua, donde hay suficiente

para millones de años de necesidades energéticas mundiales. El tritio debe producirse a partir de litio. Debido a que la reacción D-T es tan enérgica, no se necesita mucho litio para satisfacer las necesidades de un solo individuo. Una batería de computadora portátil probablemente contiene suficiente litio convertible en tritio para satisfacer las necesidades de por vida de un ciudadano promedio. Si todos los recursos conocidos de litio se utilizaran por completo para la fusión, podrían proporcionar alrededor de mil años de demanda mundial de energía. El litio existe en dos isótopos y la reacción de mejoramiento de tritio preferida

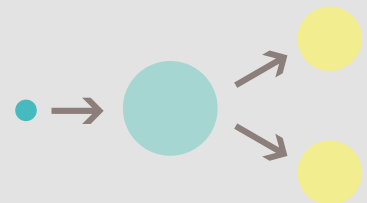
implica el isótopo más raro, litio-6, por lo que se requiere enriquecimiento (hasta ~90% ⁶Li). Existen varios métodos para lograr esto a escala de laboratorio, pero requerirán una ampliación a niveles comerciales para que la fusión tenga éxito como tecnología energética. Además, una planta de energía de fusión requerirá varios kilogramos de tritio para arrancar y mantener la operación, hasta que se produzca un suministro suficiente para la autosuficiencia. Este inventario inicial debe hacerse, ya sea en reactores de fisión, como se trabaja actualmente o, a futuro, en una flota existente de reactores de fusión.

Fusión nuclear



Une dos o más átomos más ligeros en uno más grande.

Fisión nuclear



Divide un átomo más grande en dos o más átomos más pequeños.

ABSORCIÓN DE CO₂

Una aplicación importante del hidróxido de litio anhidro (LiOH) es su utilización para la remoción de CO₂ en espacios cerrados, como submarinos o cápsulas espaciales. El hidróxido de litio es superior a los compuestos análogos de otros metales alcalinos para realizar esta función por su menor peso molecular. Una persona diariamente emite 1 kg de CO₂, para lo cual se necesita 1,1 kg de LiOH bajo condición estándar. En los submarinos se calcula que este sistema, funcionando con una eficiencia del 75%, requiere una cantidad de 1,5 kg de LiOH por persona y por día.

FUNDICIONES

Un método ampliamente utilizado para la preparación de muestras para análisis de rayos X (XRF), absorción atómica (AA) y/o espectroscopía ICP, es el de fusión de borato. La fusión es un método donde una muestra previamente oxido-reducida se disuelve en el fundente a temperaturas de alrededor de 1.050°C. Para disoluciones óptimas, debe seleccionarse la mezcla adecuada de fundente. Normalmente, se utilizan fórmulas a base de tetraborato de litio (Li₂B₄O₇) o de metaborato de litio (LiBO₂) en diferentes mezclas y proporciones. Este método es superior a otros procedimientos para la preparación de una amplia lista de materiales que incluye carbonatos, catalizadores, cementos, materiales cerámicos, ferroaleaciones, muestras geológicas, vidrio, metales puros, sílices y escorias, entre otros.

PIROTECNIA

El químico alemán Christian Gottlob Gmelin (1792-1860) descubrió que las sales de litio otorgan un color rojo brillante a la llama. Esta típica coloración está originada en una transición electrónica del Li(g) centrada en 670,8 nm. Esta coloración generada por los vapores de litio ha sido aprovechada desde hace muchísimo tiempo en los fuegos artificiales, utilizando diferentes sales de litio. En la práctica pirotécnica se han propuesto diferentes mezclas de sales de litio con otros compuestos orgánicos o inorgánicos para obtener coloraciones más estables y brillantes.



Hasta 2013 o 2014 y pese a todo lo que había aumentado el precio del litio gracias al mercado de baterías, este metal todavía era un producto secundario para SQM. Incluso cuando la mayor parte del litio que se producía en el Salar de Atacama se embarcaba para el mercado de las baterías de celulares y computadores, no representaba más de un 13% de los márgenes de la compañía. El nitrato de potasio y el yodo seguían siendo los productos más vendidos de SQM, por lo tanto, mientras la producción de cloruro de potasio en el Salar había escalado desde 600.000 toneladas anuales en 2010 a 2.000.000 en 2016, en ese mismo período SQM todavía producía 30.000 toneladas anuales de carbonato de litio y recién estaban tratando de llegar a las 50.000 toneladas.

Aunque en el mundo se vendían miles de millones de celulares y computadores que contenían litio en sus baterías, los volúmenes de venta de litio para este mercado crecían discretamente. Las cantidades de litio equivalente que usa cada uno de estos aparatos electrónicos no sobrepasan los ocho gramos.

Sin embargo, la masificación de las baterías de ion litio en computadores y teléfonos hizo que bajaran los costos de la fabricación de las baterías con litio, que antes eran muy costosas. Eso permitió que esta tecnología se viera como una opción viable para una tendencia que multiplicaría la demanda mundial del litio a niveles nunca antes vistos: el boom de los autos eléctricos.

Ya en los 90 algunas marcas como General Motors habían lanzado modelos comerciales de autos eléctricos. Pero estos primeros prototipos no prosperaron porque la tecnología de batería en ese momento permitía una autonomía que no superaba los 160 kilómetros.

En 2002 la automotriz china BYD comenzó a producir sus primeros modelos eléctricos con batería de litio, que permitía una autonomía de carga mucho mayor. Luego le siguió Tesla en Estados Unidos con el modelo Roadster, que era un convertible deportivo que causó sensación en ferias

automovilísticas. Después Tesla sacó el modelo S en 2012, tipo Sedan, y luego el modelo X en 2016, de tamaño familiar, como un SUV. Eran autos muy atractivos para personas de entre 35 y 50 años, de diseño vistoso, con una buena autonomía de kilometraje e innovaciones llamativas como el *insane button*, el botón de locura que aceleraba de 0 a 100 kilómetros en tres segundos. Los modelos S y X se transformaron en objetos de deseo, con listas de espera enormes de clientes que querían adquirir uno. Tesla fue en gran parte responsable del despegue masivo de la electromovilidad porque empujó a toda la industria automotriz tradicional a empezar también a desarrollar sus propios autos eléctricos para no quedarse atrás de esta ola. En los años siguientes la mayoría de los modelos icónicos de las distintas marcas empezaron a sacar su versión eléctrica. Volkswagen tenía su Golf y también su Volkswagen Golf eléctrico. En BMW salió el Mini Cooper y el Mini Cooper eléctrico y en Peugeot vendían el Peugeot 208 y el Peugeot e-208. Pese a que la autonomía de los vehículos eléctricos no sobrepasa en promedio los 340 kilómetros y sus precios siguen siendo mayores que un auto a gasolina, este mercado ha crecido de manera exponencial.

En el año 2015 se vendieron cerca de 400.000 autos eléctricos en el mundo y las ventas siguieron aumentando un 60% anual. La electromovilidad hizo explotar la demanda de litio en cantidades nunca antes vistas porque cada uno de estos automóviles necesitaba 70 kilos de litio para trasladar la energía al interior de sus baterías.

Esta fiebre por el litio removió todas las piezas del suministro de baterías. Hasta entonces los principales clientes de litio de SQM eran los productores de material del cátodo para baterías. Esos fabricantes vendían su producto a las empresas de baterías, quienes luego las vendían a las compañías automotrices. Así estaba estructurada la cadena. Pero cuando se empezó a observar que el mercado del auto eléctrico se iba a disparar, las empresas automotoras se dieron cuenta de que era clave asegurarse las materias primas como el litio. Los productores de litio seguían siendo pocos y podía ocurrir que la demanda fuera tan alta que escasearan las materias primas y esto coartara sus planes.



En 2015 se vendieron cerca de 400.000 autos eléctricos en el mundo y las ventas siguieron creciendo un 60% anual. La electromovilidad hizo explotar la demanda de litio en cantidades nunca antes vistas, porque cada vehículo necesitaba 70 kilos de litio para trasladar la energía al interior de sus baterías.

Con el trepidante aumento de la demanda para la industria de la electromovilidad, el litio dejó de ser un producto secundario para SQM y pasó velozmente a posicionarse como un negocio prioritario.

Esta ansiedad del sector automotriz golpeó las puertas de SQM a partir de 2012. Las empresas de autos y las de baterías fueron a hablar directamente con los productores de litio, saltándose a los fabricantes de cátodos. Al principio, el equipo comercial de SQM miró estos acercamientos con escepticismo. “No deberíamos hacer negocios con los clientes de nuestros clientes. Vamos a pisarnos la cola”, opinaban los comerciales cuando discutían qué hacer frente a estas situaciones. Inicialmente, los ejecutivos de SQM fueron muy cuidadosos y evitaron hacer acuerdos directamente con las automotrices. Pero con el tiempo, la misma industria empezó a asumir que la competencia por el litio era una tendencia que se iba a quedar. Los productores de cátodos, una industria muy atomizada, no podían controlar a los fabricantes de baterías, un mercado concentrado y con un poder de compra muy fuerte. Ni mucho menos a grandes empresas como Tesla, que ya estaba haciendo alianzas con los productores de baterías y también se estaba involucrando en otras partes de la cadena para asegurar su suministro. En vista de que esa era la nueva realidad del mercado, SQM empezó a hacer contratos con fabricantes de cátodos, con empresas de baterías y también a tener conversaciones con marcas de automóviles, barajando posibles negocios en todos los eslabones de la cadena de valor.

La carrera tecnológica impulsada por BYD y Tesla, los mayores productores de electromovilidad del mundo, llevó a que los fabricantes de baterías para automóviles eléctricos hicieran grandes inversiones en distintas tecnologías porque no se sabía –y no se sabe aún– cuál iba a tener mejor proyección en el futuro. Las principales son dos: las MCN (níquel, cobalto, manganeso y litio), que son baterías de alta gama, más sofisticadas, seguras y de mayor rango de autonomía, que usan hidróxido de litio y suelen ser preferidas por coreanos, japoneses y europeos. Las baterías que se producen con hidróxido de litio tienen una alta densidad de carga, pero por ese mismo motivo se calientan. Por seguridad, los automóviles que las usan tienen un sistema sofisticado de refrigeración y enfriamiento con ventiladores. Después vienen las baterías LFP (litio, fosfato y hierro), que usan carbonato de litio, creadas en China. Eran más baratas, pero con

Por sus características ventajosas, se pensó que el hidróxido de litio sería el producto dominante en la electromovilidad y, ante el aumento de su demanda, en 2016 SQM amplió la capacidad de su planta. Pero el carbonato de litio para baterías inesperadamente empezó a cobrar relevancia gracias a la innovación tecnológica china.

menor rango de kilometraje y menos seguras.

Por las características ventajosas que tenían las baterías MCN se creía que el hidróxido de litio iba a ser el producto dominante en la electromovilidad. En 2013 SQM comenzó a vender hidróxido de litio grado batería a Japón, Corea y Estados Unidos y ante el aumento de la demanda amplió la capacidad de su planta de hidróxido en 2016.

Pero el carbonato de litio para baterías también empezó a agarrar vuelo gracias a la innovación tecnológica china y ahora compite palmo a palmo con el hidróxido. BYD transformó las baterías LFP en una nueva versión llamada LFP Blade, que usa hojas parecidas a las de cuchillos en vez de celdas en sus cátodos. Eso las hizo más seguras y con mayor rango de autonomía. Esa invención causó que en los años siguientes gran parte de la producción de litio para baterías se desplazara hacia el carbonato de litio, porque los productores de automóviles prefieren baterías más seguras. Pero tampoco está confirmado que sea así por mucho tiempo más, porque los problemas que tienen las baterías con hidróxido de litio podrían corregirse y revertir la tendencia del mercado.

Con el gran aumento de la demanda para la industria de la electromovilidad, el negocio del litio, que solo tres años antes no sobrepasaba el 10% de los márgenes de SQM, ya había dejado de ser una actividad secundaria y pasó a ser prioritaria. A fines de 2017 ya se acercaba al 30% de los ingresos de SQM y se estaba posicionando rápidamente para convertirse en el producto más importante de la compañía. En el Salar, el gerente de hidrogeología Corrado Tore había recibido la instrucción de enfocar la explotación de los pozos a las salmueras que fueran más ricas en litio. La sección de hidrogeología, que hasta 2017 tenía alrededor de 15 hidrogeólogos, creció ese año a más de una treintena de estos profesionales para lograr optimizar la producción de litio sin sobrepasar los litros cúbicos de salmueras que tenían permitido extraer del Salar. La empresa se embarcó en ambiciosos planes de expansión para reformar y ampliar la capacidad de su planta de carbonato de litio de 48.000 a 63.000 toneladas mientras, paralelamente, construían una nueva planta con capacidad de 170.000 toneladas de carbonato de litio. Los viejos fierros



La negociación del contrato de arrendamiento con Corfo fue un proceso lento que comenzó en 2014, durante el primer gobierno de Sebastián Piñera, y concluyó cuatro años más tarde, durante la segunda presidencia de Michelle Bachelet.

y máquinas del año 1998 en la planta de El Carmen estaban siendo exigidos al máximo para aumentar la producción a casi el doble.

El boom de los autos eléctricos, sumado a la preocupación global por la crisis climática, había disparado la demanda de litio. Pero por las condiciones de su contrato de arrendamiento con Corfo, SQM estaba amarrado de manos para proyectar un crecimiento acorde a la demanda. Su límite de producción era de aproximadamente un millón de toneladas de carbonato de litio equivalente hasta 2030. Pero al ritmo de extracción que llevaban, de 48.000 toneladas al año, la cuota de litio que les permitía el Estado iba a agotarse en 2022, mucho antes de que la concesión expirara. Necesitaban urgentemente negociar las condiciones de su contrato con Corfo.

La negociación con Corfo

La negociación del contrato de arrendamiento con la Corporación de Fomento de la Producción partió en 2014, al final del primer gobierno de Sebastián Piñera, y terminó en 2018, al final del segundo gobierno de Michelle Bachelet, luego de un arduo proceso de arbitraje del Centro de Arbitraje y Mediación (CAM) de la Cámara de Comercio, la modalidad de solución de conflictos contemplada en las cláusulas originales.

A fines de 2017, cuando la resolución arbitral se acercaba, el árbitro preguntó a las partes si estaban dispuestas a negociar antes de que él diera su fallo. Era la última oportunidad de llegar a un acuerdo de conciliación. Para sorpresa de muchos, tanto SQM como Corfo se allanaron a negociar en un proceso que duró dos meses.

Corfo puso como condición subir las tasas de arrendamiento a un máximo de un 40% por el litio, en una tasa compuesta. Además, el organismo estatal decidió cobrar una suma para aporte al desarrollo regional y comunidades a pagar al Gobierno Regional de Antofagasta, Municipalidad de María Elena, de San Pedro de Atacama y de Antofagasta, y a las comunidades indígenas de San Pedro de Atacama. Y otro monto extra durante todo el período de arrendamiento, para financiar investigación y desarrollo en el país.





Asimismo, estableció la obligación de SQM de entregar a valor de reposición todos los activos –plantas, estudios y pertenencias construidas en el Salar– a Corfo al término del contrato, algo que no estaba regulado.

A cambio de lo anterior, SQM obtuvo la autorización para producir y vender más litio a partir de la misma cantidad de salmuera ya autorizada a explotar en el Salar hasta el vencimiento del contrato en diciembre de 2030. La cuota original de 180.100 toneladas anuales de carbonato de litio equivalente se acababa en mayo de 2022 y SQM solicitó autorización para producir 350.000 toneladas adicionales desde esa fecha hasta 2030. Esta medida le permitió triplicar la producción en los últimos años y entregar, con ello, una contribución histórica al país en 2022 de US\$ 5.000 millones, de los cuales US\$ 3.200 millones responden a las condiciones de arrendamiento del contrato con Corfo.

El contrato estipuló la aplicación de cualquier sanción a firme en el procedimiento sancionatorio ambiental a la empresa, que sea relevante o por causa de daño ambiental grave acreditado que no pueda ser remediado o mitigado. E incluía un auditor externo, contratado por ambas partes, para velar por el cumplimiento ambiental y otro para fiscalizar el cálculo de las rentas para el Estado. Desde el proceso de arbitraje, SQM entrega trimestralmente a Corfo una vasta cantidad de información que incluye copias de facturas, de los libros de venta, guías de despacho, documentos de aduana, de exportación y todos los datos que sustentan dicho cálculo. Para esto creó un área y contrató a un equipo que apoya la entrega de información periódica a Corfo y a la autoridad ambiental.

En cuanto a los reportes ambientales a la Superintendencia de Medioambiente, el compromiso fue reportarle en línea todas las variables de interés medioambiental, como los niveles de agua en el Salar. Esa información de monitoreo ambiental está disponible de forma transparente desde 2019 para público general en la página sqmsenlinea.com

El punto original de conflicto –una supuesta deuda de arrendamiento–, se resolvió con un pago por parte de SQM de aproximadamente 20 millones de dólares, que dejó a ambas partes conformes.

El último día de negociación, los equipos se quedaron hasta pasadas las 12 de la noche en la sala de reuniones del CAM. Proyectaron el texto desde un computador a una pantalla en la pared y pidieron pizzas, mientras las mesas técnicas y de abogados tanto de SQM como de Corfo revisaban el texto final palabra por palabra, hasta que estuvieron todos de acuerdo. SQM conservaba el Salar y obtenía una mayor cuota de producción y, con este nuevo contrato, SQM y Corfo se repartirían el margen de las ventas del litio mitad y mitad en promedio. De hecho, ha habido años en que, debido al precio del litio, el Estado se lleva un 60% y SQM un 40% del margen generado por la operación. Ninguna otra industria en Chile entrega tanto, si se suman los impuestos de primera categoría, la renta de arrendamiento, el *royalty* y los aportes regionales acordados por contrato.

En febrero de 2018, en el último mes del gobierno de Bachelet, el nuevo contrato vio la luz para la firma, y el 11 de abril entró en vigencia.

Con esto, SQM estaba lista para echar a andar la nueva expansión de capacidad de la planta de carbonato de litio. Pero justo entonces los golpeó un mazazo: en 2018 los productores chinos sacaron al mercado un estándar de litio para baterías muchísimo más puro que el de SQM y el 30% del litio del Salar se quedó sin vender durante ese año. Fue como si les hubiera pasado un tren por encima, sin previo aviso. ¿Cómo llegó a ocurrir algo así?

La información de monitoreo ambiental de SQM, como los niveles de agua en el Salar de Atacama, está disponible de forma transparente desde 2019 en sqmsenlinea.com.

El terrorífico estándar chino sacude el mercado

Con la bonanza imparable que prometía la electromovilidad a SQM llegaron nuevos y fieros competidores. Frente a las proyecciones de un consumo seis veces mayor de litio para el año 2030, entraron a la pelea nuevos productores de litio que llevaron los niveles de competencia tecnológica de este mercado a niveles superlativos. Coreanos, japoneses y chinos, que contaban con la ventaja de ser mercados muy masivos y con una escala de investigación y desarrollo muy superior a la chilena. Si en el Salar de Atacama SQM tenía a diez investigadores dedicados a mejorar los procesos de producción de litio, en China, Japón y Corea tenían a 10.000 personas investigando cómo mejorar los procesos de producción convencionales de carbonato e hidróxido de litio y replicaba decenas de procesos nuevos que hoy se siguen evaluando para reemplazar a los procesos normalmente utilizados.

En el intertanto, SQM no se había enterado de que este ejército de nuevos procesos estaba pisándole los talones. En el Salar de Atacama seguían concentrados en producir litio a partir de salmueras por medio del proceso convencional que trajeron los norteamericanos en los años 70, estudiado en conjunto con Corfo y entregado a las empresas cuando se hicieron las primeras licitaciones en los años 80. Ya era un proceso conocido y estudiado cuando SQM partió con el negocio del litio en 1996 y que se replicaba tal cual en otras plantas del mundo. La salmuera del Salar de Atacama se concentraba en pozas de evaporación solar hasta obtener una solución concentrada con un 6% de cloruro de litio. En la planta de carbonato de El Carmen a esa salmuera se le removía sucesivamente el boro, el magnesio y también las trazas de calcio y de sulfato. Finalmente a esa solución purificada se le agregaba ceniza de soda y se cristalizaba el carbonato de litio con una pureza lo suficientemente alta para su comercialización.

También seguían produciendo el hidróxido de litio con el mismo método que se usaba en el mundo hacía décadas, usando carbonato de litio como materia prima y alcalinizando el carbonato de litio con cal. Creaban

SQM sabía que ostentaba los costos de producción más baratos de la industria mundial del litio y siguió produciendo al mismo ritmo sin prevenir que en 2018 el precio caería y que el litio empezaría a acumularse en sus bodegas.

una lechada de cal, precipitaba carbonato de calcio y en la solución quedaba una salmuera con hidróxido de litio. Luego, en un sistema de evaporadores y cristalizadores, se llevaba la solución a hidróxido de litio cristalizado.

Esas eran las dos vías de producción convencional que tenía SQM y que se usaban en el mercado mundial desde los inicios de la industria del litio. La otra ruta para producir carbonato e hidróxido de litio era partir del tratamiento de los minerales de litio en roca, que intentaron primero los norteamericanos, y después los chinos, y que era más caro. Había que disolver con ácido sulfúrico para obtener una solución de sulfato de litio. Agregando hidróxido de sodio se obtenía hidróxido de litio. Y agregándole carbonato de sodio, se podía cristalizar y obtener carbonato de litio, que fue lo que hicieron originalmente en China. No era un buen carbonato, porque tenía mucho sulfato, pero servía para usos industriales. Ese fue el método que empezaron a mejorar silenciosamente los productores chinos.

Con la seguridad de tener los costos de producción más baratos del mundo, SQM siguió produciendo con toda tranquilidad su producto y cuando a partir de 2015 subió bruscamente la demanda de litio por las necesidades de la electromovilidad, los comerciales de SQM estaban felices. Los fabricantes de baterías, cátodos y hasta empresas automotrices como Tesla compraban todo el litio que se producía en el Salar. Los productores en el mercado eran pocos y la demanda era mucha, entonces SQM ofrecía las calidades de litio que tenía y vendía todo. En el Salar estaban orgullosos de la calidad de sus litios a la medida que estaban produciendo para los distintos productores de baterías. Estaban seguros de que tenían las mejores plantas del mundo.

Hasta que en 2018, de un año al otro, y justo cuando estaban tratando de aumentar la producción de carbonato de litio al doble, el precio mundial del litio empezó a bajar y las ventas de SQM cayeron en forma estrepitosa. Los productores de baterías dejaron de comprar a SQM y no se sabía por qué. Para la compañía fue como revivir la antigua pesadilla del salitre. Se empezaron a acumular sacos y sacos de carbonato de litio, tal como había ocurrido con las tortas de nitrato de sodio en los años 80.

En el nuevo contrato negociado con Corfo, se estableció que si se detectaba un solo incumplimiento ambiental, esto sería causal inmediata de término.





A esto se sumó que en ese tiempo ocurrieron accidentes notorios con algunos celulares que explotaban al cargarse, como el Galaxy Note 7, que se tuvo que retirar del mercado. E incluso algunos aviones que usaban baterías de litio en su sistema electrónico habían sufrido incendios. Las baterías de ion litio son un material tan eficiente como potencialmente inflamable si es que hay trazas de partículas magnéticas o metálicas que causen daños en ellas. Por este motivo el mercado de baterías y de cátodos se volvió sumamente exigente con los proveedores de materias primas para que entregaran productos lo más puros posible. No solo con el litio, sino también el cobalto, el manganeso, el níquel y más de 20 elementos distintos que componen los materiales de batería. Las especificaciones para los contaminantes llegaron a niveles superlativos. Si antes las partículas magnéticas, por ejemplo, se medían en partículas por millón, ahora tenían que cumplir estándares de partículas por billón. En SQM se habían esforzado en los últimos años por cumplir la mayor parte de esas especificaciones y creían que lo estaban haciendo bien. Pero de un día para otro se encontraron con portazos de todos los clientes del mercado de las baterías. Les decían que en China sus competidores habían encontrado formas de producir litio con mucha mayor pureza de la que ofrecía SQM.

Al principio no entendían qué era lo que estaba pasando. Los comerciales elucubraban tras las reuniones infructuosas con clientes: ¿Será verdad que es mejor el producto que están haciendo los chinos? ¿O lo están inventando para bajar los precios? El año pasado todo el mundo quería nuestro litio, ¿Por qué ahora nos dicen que es un mal producto? Fue una verdadera crisis de identidad.

Era cierto que ante una mayor oferta de productores de litio, los clientes podían echarse para atrás en su silla y regodearse negociando precios y calidades. Pero incluso cuando los ejecutivos comerciales, ya desesperados, insistían con una rebaja de precio, se vieron en la insólita situación de escuchar como respuesta: “Esto no se trata de precios. ¡No me bajes el precio! El problema es que no puedo usar tu producto, no me sirve”.

Necesitaban salir de las dudas. A través de terceros compraron o consiguieron muestras de todos los competidores para analizarlas. Cuando averiguaron los estándares y niveles de contaminantes que tenían los productores chinos, los procesistas de SQM Salar se quedaron helados. La especificación de sodio del litio más puro de SQM era de 600 y el estándar chino era de 250. La pureza del carbonato de litio de SQM era de 99% y la del litio chino era de 99,4%. El nivel de calcio era 200 y el de China era 50. Los niveles de partículas magnéticas de SQM eran de 500 partes por billón y en el estándar chino era tres veces menor que eso.

No tenían idea de cómo lograr esa calidad. Ni siquiera se habían planteado que fuera posible llegar a esos niveles de pureza que les parecían casi esotéricos.

Se quedaron aún más atónitos al comprobar que había estándares de calidad en China que eran relativamente antiguos, de los años 2012 o 2013. Es decir, no había sido de un día para otro. Los productores chinos se caracterizan por ser muy estructurados y ordenados porque a nivel estatal planifican centralizadamente el desarrollo de la economía. El gobierno chino se focalizó intensivamente en generar un desarrollo de toda la industria del litio con estándares de calidad y pureza a la medida de su también bullente industria de electromovilidad. Como no tenían suficiente litio en salmuera y minerales en China, compraron litio en bruto de Australia. En Australia las minas de litio en roca comenzaron a producir grandes cantidades de concentrado de espodumeno que después eran tratadas en las impecables plantas de conversión en China para producir carbonato e hidróxido de litio.

Cuando ya tuvieron suficiente producción interna de litio, las empresas chinas impusieron su propio y casi inalcanzable estándar de calidad. Anunciaron que no comprarían productos que no cumplieran esa especificación y dejaron de comprarle litio a SQM, que empezó a quedar fuera de algunos mercados. También los japoneses y los coreanos, que habían sido los mayores fabricantes de baterías del mundo y ahora estaban siendo desplazados por China, hicieron su propio desarrollo y alcanzaron un estándar

dar de calidad que SQM no podía cumplir. La demanda de litio que Japón y Corea no lograban suplir internamente empezaron a importarla desde China en vez de seguir comprando un producto de peor calidad a SQM.

Todo esto se podría haber anticipado si hubieran estado atentos a lo que ocurría en el mercado asiático. Hacía ya al menos cinco años que los chinos habían estandarizado su forma de producir y la calidad de sus productos. ¿Cómo había sido posible que SQM, la empresa más grande del mercado, no se hubiera enterado?

La primera razón fue bastante rústica: los documentos clave y publicaciones científicas sobre las nuevas calidades y procesos se habían publicado en chino y no habían llegado a los escritorios ni bandejas de correo de los investigadores de SQM en Chile. Un error que hoy los procesistas del área de investigación y procesos evitan leyendo todas las semanas los últimos *papers* que se publican en China, aunque tengan que recurrir a una aplicación del celular para traducir del chino mandarín al inglés. En un sector tan dinámico y competitivo como el del litio es clave adelantarse a lo que viene.

El siguiente motivo de esta desconexión es que SQM había dejado de vender sus productos en China en el año 2016. La planta estaba restringida en su capacidad y tenían que seleccionar a cuáles clientes les iban a vender. En esa época los precios en China eran más bajos que los precios de afuera y a SQM le pareció más rentable enfocarse en mercados que pagaban mejor, como Corea, Japón y Estados Unidos. Esa decisión fue vista como una afrenta y una decisión cortoplacista por los clientes chinos y SQM perdió las relaciones cordiales que había forjado con sus antiguos socios comerciales del gigante asiático. Por haber salido de aquel mercado, los comerciales de SQM dejaron de enterarse de lo que estaba pasando en ese país a través de fuentes directas. Como consecuencia, nunca vieron venir el contraataque de los productores chinos, que en 2018 les quitaron a esos mismos clientes en Corea, Japón y Estados Unidos.

Un año que había comenzado tan optimista y prometedor con la firma del contrato Corfo terminó convertido en película de terror. De las





En 2015, sabiendo que tenía los costos de producción más bajos del mercado, SQM siguió produciendo carbonato e hidróxido de litio sin imaginar que menos de tres años después –a la vuelta de la esquina– lo esperaba una tormenta que sacudiría a la compañía.

70.000 toneladas de carbonato de litio equivalente que esperaban vender en 2018 se vendieron 46.000 toneladas y a precios regalados, porque quedaban pocos clientes que les quisieran comprar. El 30% del litio que se produjo ese año quedó guardado en las bodegas, sin poder venderse. Falló estrepitosamente la conexión entre la calidad que esperaba el cliente y la calidad que SQM era capaz de producir.

Fue el comienzo de una crisis monumental del negocio del litio para SQM, porque tenían una planta en ampliación y otra nueva en plena construcción y ninguna de las dos estaba en condiciones de generar un producto con calidad apta para el mercado de baterías. Más encima, la expansión que habían hecho en la planta resultó mal diseñada y el producto salía de peor calidad que antes. Ese carbonato de litio no lo quería absolutamente nadie. Incluso los productores de baterías de Japón, que habían sido clientes fieles de SQM, dejaron de comprarles. El estándar chino dejó a SQM fuera del mercado.

Fue un baldazo de agua fría darse cuenta de un momento a otro que como empresa habían estado avanzando por un camino, mirando dentro de su propia caja sin levantar la vista y mientras tanto los competidores chinos habían pasado a la velocidad de la luz por el lado.

Pecaron de falta de visión. Habían fallado en adelantarse a lo que venía y también en la comunicación entre las áreas de producción y comercial, que deberían haber trabajado mucho más alineadas.

Esta catástrofe terminó con un cambio profundo en toda la organización de SQM. Si querían sobrevivir en la feroz industria del litio tenían que buscar una forma de salir de ese agujero profundo en el que habían caído, y rápido. Aunque el mercado los había pillado distraídos, SQM siempre ha sido una empresa que reacciona con velocidad y rebota de sus caídas como un mono porfiado.

Para liderar el proceso de cambio que necesitaban recurrieron a la resiliencia interna de la compañía. Convocaron hasta el Salar a un equipo

veterano del área de nitratos de SQM que incluyó a Carlos Díaz, Pablo Altimiras y Gabriel Meruane, que ya tenían experiencia probada en hacer innovaciones sustantivas y rápidas de los procesos productivos en las plantas de Coya Sur. Fue una decena de personas nuevas las que se sumaron desde nitratos a prestar apoyo al equipo del Salar, no 200 ni 300. Cualquier mejora que se emprendiera tendría que ser con los mismos equipos y con los mismos fierros, porque se tenía que lograr en muy poco tiempo.

El primer paso para cambiar es reconocer que hay un problema y hacer un diagnóstico honesto de lo que está fallando. Asumir la necesidad de cambiar no fue nada fácil: en la planta estaban convencidos de que SQM hacía el mejor litio del mundo y de que su forma de trabajar era la correcta, porque siempre habían funcionado así. Fue necesario involucrar a equipos completos en la misión de mejorar todos los procesos, porque si no el producto no se podía vender.

La pregunta, en realidad, no era si podían alcanzar el estándar de calidad de China. La pregunta era cuánto les iba a costar. Gabriel Meruane, gerente de investigación y procesos, le planteó este dilema a Carlos Díaz:

–¿Cuánto podemos gastar?

Él le respondió:

–Lo que sea necesario. Esta cuestión hay que sacarla adelante. Si no, no hay negocio.

Con la billetera disponible, fue más fácil echar a volar la imaginación para buscar soluciones rápidas con los recursos que había adentro y fuera de SQM.

Lo más urgente era corregir la planta nueva y modificarla rápidamente con los mismos materiales que se habían comprado. Y empezar a trabajar en el desarrollo de un conocimiento que faltaba para poder llevar el carbonato e hidróxido de litio a un estándar de calidad muy diferente al que habían hecho hasta entonces.

El equipo comercial contactó rápidamente a los clientes con los que existía mayor confianza en Corea y Japón para diagnosticar qué es lo que estaba fallando en el producto, desde el punto de vista técnico: qué es lo

Para enfrentar la crisis, la compañía recurrió a la resiliencia interna, como muchas otras veces en el transcurso de su larga historia. Un equipo del área de nitratos, con experiencia irrefutable en innovaciones rápidas en procesos productivos, lideró la contingencia a la velocidad que se requería.

que querían en ese momento y qué es lo que iban a querer en el futuro. También se planteó la intimidante y urgente misión de volver a ganarse a sus antiguos y aún dolidos clientes del mercado chino. El equipo de investigación y procesos hizo su propia campaña de búsqueda de información con especialistas en Rusia, China, Estados Unidos y Europa, para hacer una investigación técnica profunda de cómo se estaba desarrollando el negocio del litio en distintos lugares.

Trabajaron varias aristas en paralelo: inteligencia de negocio, gestión de calidad, desarrollo de conocimiento técnico. Todo, mientras el área de producción seguía aumentando la capacidad de producción de las plantas, exigiéndolas al máximo. Aunque la calidad del producto en ese momento fuera deficiente, tenían que seguir creciendo y aumentando la producción, porque la demanda del mercado mundial era algo imparable.

El desafío del nuevo equipo liderado por Carlos Díaz era titánico: en menos de dos años tenían que aumentar la producción de litio a más del doble y, al mismo tiempo, mejorar la calidad y bajar las impurezas en menos de la mitad, porque si no, no iban a vender nada. Cuando los alicaídos equipos de producción dudaban de que un cambio tan radical fuera posible, él les recordaba que redoblar la producción y replantear drásticamente los procesos era algo que ya habían hecho antes, en nitratos. “Si los chinos pueden, nosotros también podemos” se transformó en una especie de grito de guerra en la planta.





En 2018, el 30% de la producción de litio se quedó en las bodegas de SQM, sin poder venderse, por una desconexión entre la calidad que los clientes necesitaban y la que la compañía estaba siendo capaz de producir.

La ciencia de las baterías de litio

LA REVOLUCIÓN DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO

Las primeras baterías de ion litio fueron creadas en 1979 por el físico estadounidense y premio Nobel de Química 2019 John B. Goodenough, quien, en su búsqueda por encontrar alternativas a la crisis del petróleo en 1973, comenzó a ver las posibilidades del litio para la transformación de energía. El investigador desarrolló las primeras baterías de litio con un cátodo de óxido de cobalto de litio. Estas baterías fueron revolucionarias en el mercado ya que debido a su bajo peso resultaron muy atractivas para los dispositivos pequeños.

En 1985, el químico japonés Akira Yoshino perfeccionó esta tecnología, creando las baterías de ion litio con material carbonoso. ¿Cómo hizo esta mejora? Inicialmente (1981), Yoshino comenzó a

realizar investigaciones acerca de baterías recargables con el uso de un polímero electroconductor (poliacetileno). Posteriormente (1983), Yoshino fabricó un prototipo recargable para la batería LiCoO_2 descubierta previamente por Goodenough (1979). El poliacetileno, debido a su baja densidad real, necesitaba un gran volumen de batería y presentaba problemas de inestabilidad. Yoshino cambió este polímero por un material carbonoso como cátodo. El investigador descubrió que el material carbonoso con cierta estructura cristalina era adecuado como material de ánodo, además desarrolló el colector de corriente de lámina de aluminio, el cual formaba una capa de pasivación que permitía un alto voltaje de la celda a un bajo costo.

También desarrolló una membrana separadora funcional y el uso de un dispositivo de coeficiente de temperatura positivo (PTC) para tener más seguridad. Yoshino concibió la estructura bobinada de la batería de ion litio para proporcionar una gran superficie de electrodo y permitir una descarga de alta corriente a pesar de la baja conductividad del electrolito orgánico. En resumen, Yoshino reemplazó el agua por solvente orgánico, utilizó carbono como electrodo negativo y óxido de cobalto de litio como material para el electrodo positivo. De esta manera, el investigador logró que estas baterías alcanzaran los cuatro voltios, y creó la lógica de trabajo que aplican las baterías de litio actuales.

El Dr. Akira Yoshino, el Dr. Stanley Whittingham y el Dr. John Goodenough fueron galardonados en 2019 con el Nobel de Química por su contribución al desarrollo de las baterías de iones de litio. Seis años después, en el año 1991, la compañía Sony desarrolló la primera versión comercial de una batería recargable de iones de litio, que hasta la fecha es la más exitosa en el mercado.

A pesar de que las baterías de ion litio son una tecnología del siglo pasado y que Sony comercializó este tipo de baterías desde 1991, no se consiguieron grandes avances hasta 2010. Esto se debe a que no se conocía de manera profunda la química del enlace de litio en las baterías, lo que fue crucial para volverlas más seguras y mejorar su rendimiento.



Batería recargable de litio desarrollada por Sony.

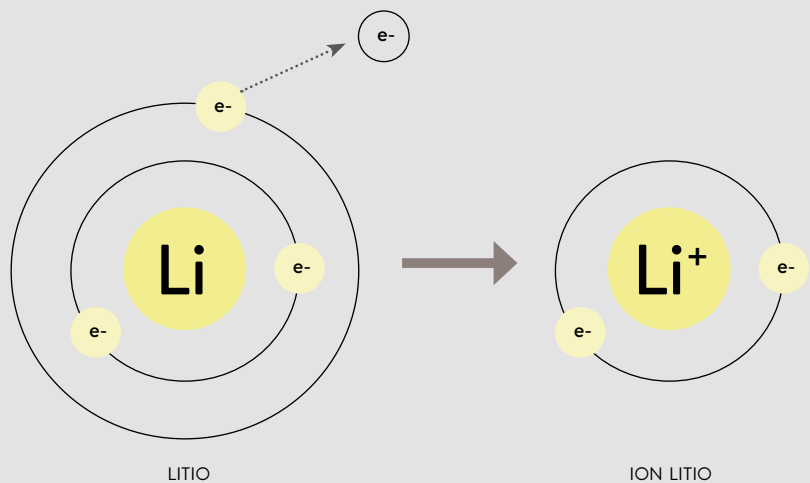
¿CÓMO FUNCIONA UNA BATERÍA DE LITIO?

Para comprender cómo funciona una batería de ion litio, lo primero es entender por qué el litio es tan necesario para esta tecnología.

El litio es un metal que cuando está en estado puro es altamente reactivo. De hecho, es tan reactivo que incluso reacciona con el aire y también de manera muy violenta con el agua. Esto ocurre porque este metal solo tiene un electrón en su cubierta exterior y, sobre todo, porque es el metal que tiene el menor potencial de reducción (-3,05 V), lo que significa que es el elemento químico con mayor tendencia a ceder electrones.

Cuando un átomo de litio cede su electrón externo, queda cargado positivamente, lo cual se representa como Li^+ y se llama ion litio. Esta facilidad para ceder electrones es el motivo por el que el litio es el elemento de mayor demanda en la actualidad para la fabricación de baterías. Y también por este motivo es que son llamadas baterías de ion litio y no baterías de litio.

Elemento	Volt (V)
F	2,8
Ag	1,69
Cu	0,34
Hg	0,24
H	0
Fe	-0,44
Zn	-0,76
Al	-1,66
Mg	-2,37
Li	-3,04



Desde un átomo de litio a un ion litio y electrón libre.

Potenciales redox de mayor a menor.

Las baterías están compuestas de tres partes principales:

• **Ánodo**

Es el electrodo negativo, lo que quiere decir que en esta zona es donde se desprenden electrones. Las reacciones de pérdida de electrones son las llamadas reacciones de oxidación.

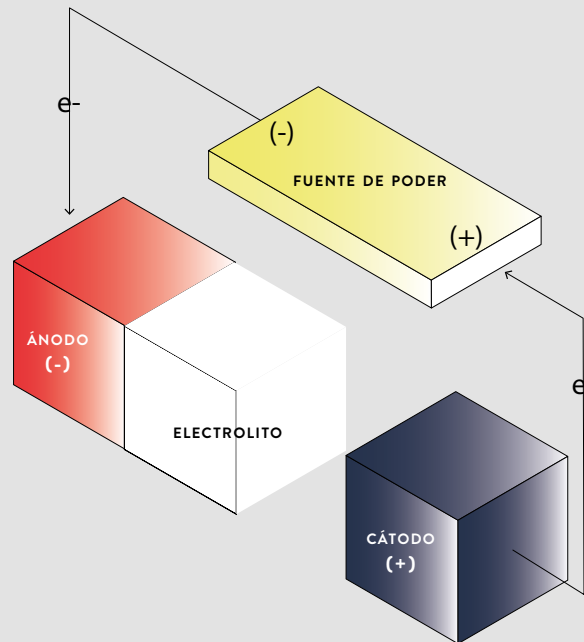
• **Cátodo**

Corresponde al electrodo positivo, es decir, es la zona donde se aceptan los electrones de alguna sustancia. A estas reacciones se las llama reacciones de reducción.

• **Electrolito**

Es una sustancia que se comporta como un conductor eléctrico. En las pilas, el electrolito actúa como un separador entre el ánodo y el cátodo, lo que ayuda a mantener el equilibrio entre las cargas de ambos.

El electrolito permite solo el flujo de iones, no de electrones, por lo cual los electrones se deben mover a través de un circuito externo. Entonces, al aplicar voltaje ocurre una reacción química en el cátodo, en donde se consumen electrones. Y ocurre otra reacción en el ánodo, donde se producen electrones. Esto genera una nube de carga negativa alrededor del cátodo, y carga positiva alrededor del ánodo. Los iones que fueron captados previamente por el electrolito se mueven para neutralizar las cargas, lo que permite que las reacciones puedan continuar y de esta manera los electrones puedan seguir fluyendo.

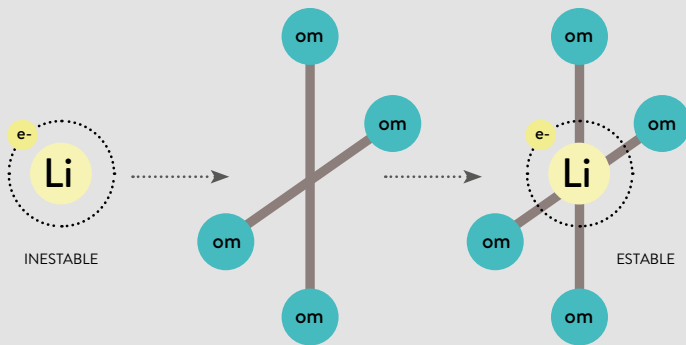


Esquema general de una batería.

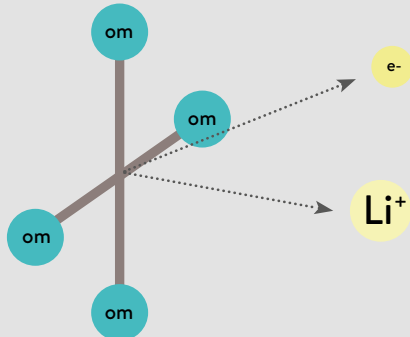
Las celdas de litio

El truco de una batería de ion litio es el hecho de que, al estar en estado puro, el litio es un metal reactivo, pero al formar parte de un óxido metálico es bastante estable. Al sacar un átomo de litio del óxido de metal, debido a que es muy inestable formará inmediatamente un ion de litio y un electrón.

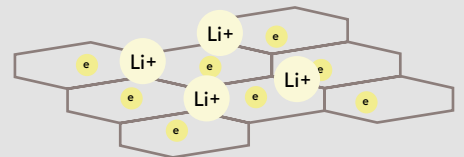
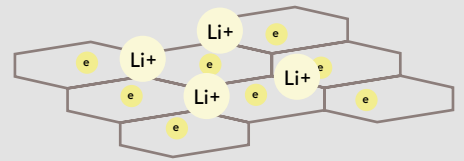
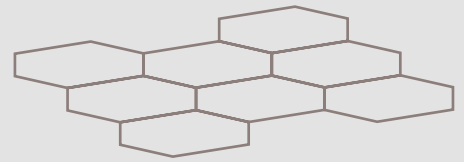
Una celda de litio utiliza electrolito, un ánodo de coque (muy similar al grafito) y un cátodo de óxido de cobalto-litio. Las estructuras en capas del coque se unen libremente de modo que los iones de litio se puedan almacenar fácilmente ahí. El electrolito, entre el coque y el metal, actúa como un protector que solo permite el paso de iones de litio.



Esquema de cómo el litio se estabiliza en un óxido metálico.



Cómo se forma el ion litio y electrones dentro de una celda.



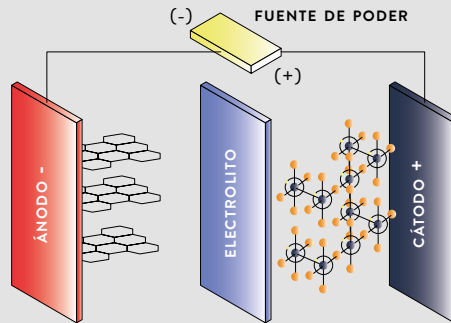
Esquema de cómo se disponen los iones de litio y electrones en el ánodo de coque.

Para que se comprenda de manera simple, se presenta a continuación el esquema general de una celda de litio, viéndola desde dentro:

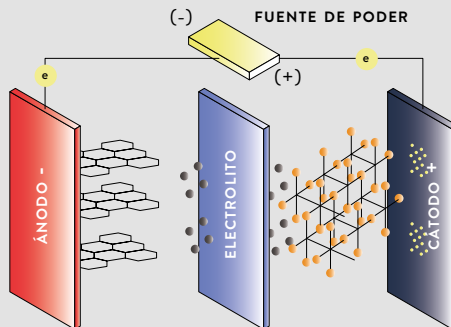
Al conectar una fuente de poder, como por ejemplo un cargador de celular, el lado positivo capta a los electrones de los átomos de litio, y los electrones fluyen a través del circuito externo porque no pueden fluir a través del electrolito, y por este circuito externo llegan a las capas de coque. Los iones de litio que tienen carga positiva son atraídos por la carga negativa y pasan a través del electrolito.

Luego, tanto los iones de litio como los electrones quedan atrapados entre los espacios de las capas de coque. Cuando esto ocurre, se dice que la celda está completamente cargada. De esta manera se logra el primer objetivo, que los iones de litio y electrones se desprendan del óxido de metal.

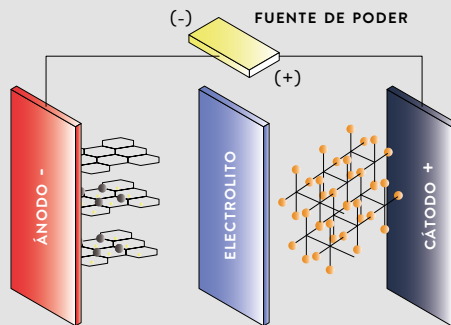
Cuando la celda está cargada, al conectar un equipo electrónico como por ejemplo un celular, los iones de litio quieren volver a su estado estable como parte del óxido de metal. Debido a esta tendencia, los iones de litio se mueven a través del electrolito y los electrones por el circuito externo, alimentando el aparato electrónico que se conecta.



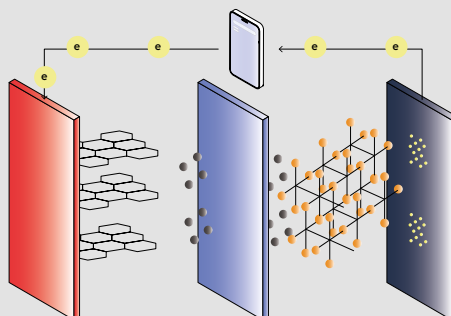
ESQUEMA INTERNO DE UNA BATERÍA ANTES DE SER CONECTADA A UNA FUENTE DE PODER.



MOVIMIENTO DE IONES DE LITIO Y ELECTRONES AL CONECTAR UNA FUENTE DE PODER.



UNA BATERÍA POR DENTRO AL COMPLETAR SU CARGA.



CÓMO LAS BATERÍAS DAN ENERGÍA A LOS APARATOS ELECTRÓNICOS.

En resumen, para generar electricidad se deben cumplir dos condiciones:

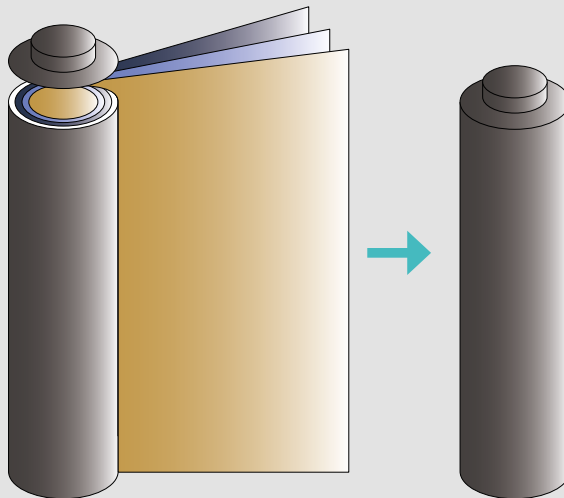
1. Separar los átomos de litio del óxido metálico.
2. Guiar los electrones perdidos de ese átomo de litio a través de un circuito externo.

El voltaje ofrecido por la batería depende de la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo. Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor voltaje obtendremos. Entonces, para el ejemplo previamente descrito, el potencial electroquímico del coque es mayor que el del óxido de cobalto. Por lo tanto, los iones de litio deben subir desde el potencial del cátodo al potencial del ánodo.

Si la temperatura interna de la celda aumentara por condiciones anormales,

se evaporaría el electrolito generando un cortocircuito entre el ánodo y el cátodo, lo que podría generar un incendio o explosión. Para evitar esta situación, se coloca una capa aislante llamada separador entre los electrodos, en donde el separador es permeable y permite el paso de los pequeños iones de litio, pero no el de los electrones.

En una celda de litio, el coque se recubre con láminas de cobre y el óxido de metal con láminas de aluminio. Las láminas actúan como colectores de corriente, de esta forma las lengüetas positivas y negativas se pueden sacar fácilmente de los colectores de corriente. La sal orgánica de litio actúa como electrolito y se recubre en una hoja separadora. En una pila, se tiene un núcleo central de acero y las tres láminas se enrollan en el cilindro.

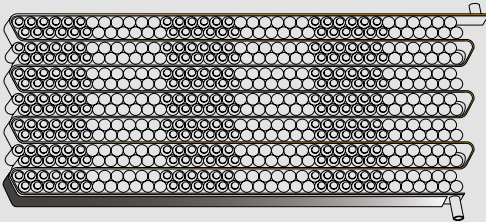


Cómo se fabrica una celda eléctrica (pila).

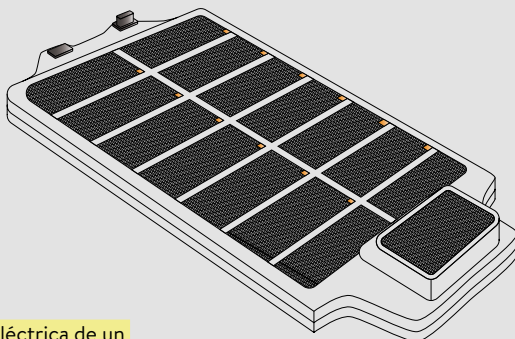
LAS BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

¿Cómo funciona una batería moderna de litio?

A continuación se ilustra una batería Tesla de vehículos eléctricos. Muchas de estas celdas se conectan en serie y paralelo para formar módulos. Las celdas de iones de litio producen mucho calor durante la operación. Esto puede ser un problema porque una temperatura alta disminuye el rendimiento de la celda. Para evitarlo, se utiliza un sistema de gestión de baterías que ayuda a mantener la temperatura óptima de las celdas y a que todas las celdas puedan cargarse y descargarse por igual. También da la ventaja de que, en una situación muy demandante de energía, la tensión de descarga se pueda dividir por igual en cada una de las celdas. Si se tratara de una única celda grande, al ser sometida a mucha presión provocaría su muerte prematura. En el caso de las baterías Tesla para un automóvil eléctrico, se unen 16 de estos módulos.



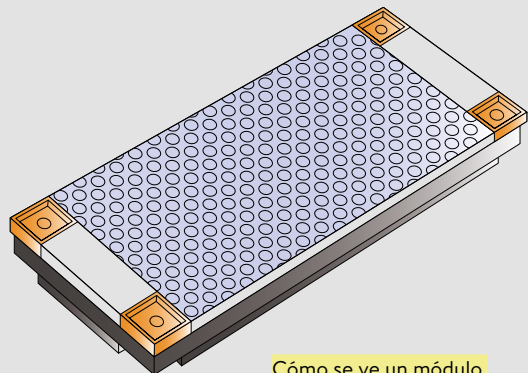
Múltiples celdas formando un módulo de batería eléctrica de automóvil.



Batería eléctrica de un vehículo eléctrico Tesla.

TIEMPO DE VIDA DE UNA BATERÍA

El tiempo de vida de una batería está determinado por sus ciclos de carga. Un ciclo de carga se produce cuando se utiliza toda la energía que puede almacenar una batería. Pero esto no implica necesariamente una única carga. Por ejemplo, en un teléfono móvil un ciclo de carga se completa cuando la batería del mismo se ha descargado hasta el 100% de su capacidad. Esto no significa que solo cuente cuando se descarga desde 100% a 0% sin interrupción. Por ejemplo, si durante la noche el celular está con un 15% de carga, y se deja cargar hasta que llegue a su 100%, al día siguiente, al desconectar el cargador y cuando la batería se descargue hasta el 85%, se habrá completado un ciclo.



Cómo se ve un módulo eléctrico por fuera.

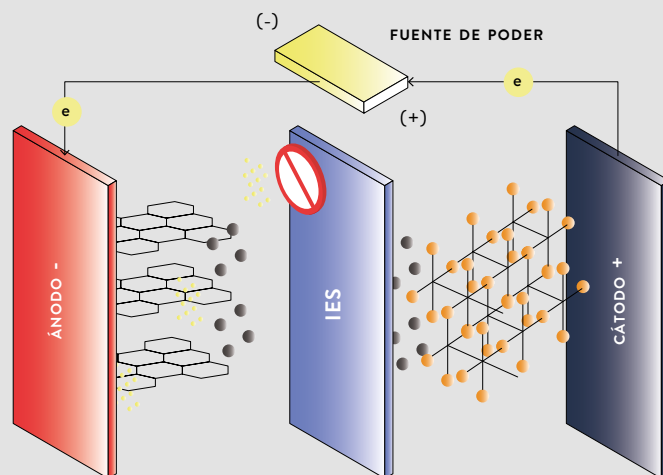
LA VENTAJA IMBATIBLE DEL LITIO PARA ALARGAR LA VIDA DE BATERÍAS

¿Por qué el litio ha sido superior a otros elementos en cuanto a la duración de las baterías? Esto se explica por un fenómeno “mágico” que ocurre cuando los iones de litio pasan a través del electrodo en la celda durante su primera carga, que evita que las celdas de iones de litio mueran pronto.

Como se ha mencionado anteriormente, cuando comienza el proceso de carga de una batería, los iones de litio y los electrones quedan atrapados entre las capas de coque. Que los electrones queden atrapados ahí es un gran problema, ya que estos, al entrar en contacto con el electrolito, lo degradan, disminuyendo el tiempo de vida de la batería. Sin embargo, cuando los iones de litio pasan a través del electrolito ocurre un fenómeno llamado interfaz de electrolito sólido (IES). Cuando se carga la batería y los iones de litio pasan por el electrolito, las moléculas de disolvente en el electrolito cubren las moléculas de litio. Al llegar al lado del grafito, los iones de litio junto a las moléculas de disolvente reaccionan con el grafito, formando una capa llamada IES. Esta capa impide el contacto entre electrones y electrolito, evitando así su degradación.

La formación de la capa de IES es muy positivo ya que solo consume el 5% del litio y todo el resto contribuye al funcionamiento de la batería. Es decir, por un porcentaje ínfimo de litio se puede aumentar la durabilidad en el tiempo de la batería. A pesar de que la capa de IES fue un descubrimiento accidental, tras muchas décadas de investigación los científicos han optimizado el grosor y la química de esta capa para mejorar el rendimiento de celdas.

El ciclo actual de ciclos de carga y descarga de una batería de iones de litio es de 3.000 ciclos. El mundo de la ciencia e investigación está trabajando aceleradamente para llevarlo a 10.000 ciclos. Si este objetivo se logra, las baterías de los automóviles podrían durar hasta 25 años.



Formación de IES para la protección del electrolito.

6 CARACTERÍSTICAS QUE HACEN A LAS BATERÍAS DE ION LITIO LÍDERES EN EL MERCADO TECNOLÓGICO MUNDIAL

1. **Elevada densidad de energía**
Acumulan mucha mayor carga por unidad de volumen.
2. **Poco peso**
A igualdad de volumen, son menos pesadas que las de tipo Ni-MH o Ni-Cd.
3. **Poco espesor**
Se presentan en placas rectangulares, con menos de 5 mm de espesor. Esto las hace especialmente interesantes para integrarlas en dispositivos portátiles.
4. **Carecen de efecto memoria**
El efecto memoria es un fenómeno que reduce la capacidad de las baterías con cargas incompletas. Dicho fenómeno se produce cuando se carga una batería sin haber sido descargada del todo previamente: se crean unos cristales en el interior a causa de una reacción química al calentarse la batería, bien por uso o

por las malas cargas. Para prevenirlo no hace falta esperar a descargar totalmente la batería antes de realizar una carga, basta con que una de cada cierta cantidad de cargas sea completa.

5. **Descarga lineal**
Durante toda la descarga, el voltaje de la batería apenas varía, lo que evita la necesidad de circuitos reguladores. Esto puede ser una desventaja, ya que hace difícil averiguar el estado de carga de la batería.
6. **Baja tasa de autodescarga**
Al guardar una batería, esta se descarga progresivamente, aunque no se use. En el caso de las baterías de Ni-MH, esta “autodescarga” puede suponer un 20% mensual. En el caso de Li-Ion es de solo un 6% en el mismo período.

Como se puede ver en la tabla, las baterías sodio-azufre (NaS) y redox de vanadio (VRB) se destacan en términos de densidad de potencia (NaS) y vida útil del ciclo (VRB). Sin embargo, ninguna de estas tecnologías es factible a nivel industrial de forma masiva. En el caso de las baterías sodio-azufre, no son adecuadas porque la temperatura de operación debe estar en el rango entre 300-350°C, mucho más alta que la esperada en un módulo integrado. Las baterías redox de vanadio requieren el uso de bombas, sensores, sistemas de monitoreo y grandes recipientes, lo cual las vuelve poco viables. Por lo tanto, en cuanto a densidad de energía y eficiencia, las baterías de ion litio son la mejor alternativa por sobre las de plomo-ácido, níquel-cadmio y níquel-metal hidruro. Además, estas baterías evitan el uso de elementos tóxicos y no tienen problemas de efecto memoria. Sin embargo, las celdas de ion litio son normalmente más caras que las de plomo-ácido y níquel-cadmio, y son propensas a la autodescarga.

Comparación de los diferentes tipos de tecnologías en baterías y sus características.

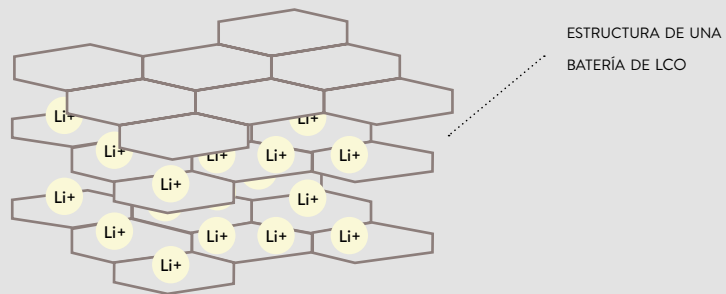
TIPO DE BATERÍA	Plomo ácido	Níquel Cadmio	Níquel Metal Hidruro	Ion Litio	Sodio Azufre	Redox de Vanadio
	LA	NiCd	NiMH	Li-ion	NaS	VRB
Densidad de energía (Wh/kg)	25-50	50-60	60-120	75-200	150-240	10-30
Potencia específica (W/kg)	75-300	~200	250-1.000	500-2.000	150-230	80-150
Ciclo de vida (100% profundidad de descarga)	200-1.000	>1.500	180-2.000	1.000-10.000	2.500-4.000	>12.000
Costo de capital (\$/kWh)	100-300	300-600	900-3.500	300-2.500	300-500	150-1.000
Eficiencia de carga y descarga	75-85	70-75	65-80	85-97	75-90	75-90
Autodescarga	Baja	Alta	Alta	Media	-	Insignificante

LOS PRINCIPALES TIPOS DE BATERÍAS DE LITIO

1) Óxido de litio y cobalto (LiCoO₂) - LCO

Para tecnologías portátiles masivas de la actualidad como teléfonos móviles, *notebooks* y *tablets* se utiliza comúnmente baterías LCO, debido a su alta energía específica.

Este tipo de batería está compuesta por un cátodo de óxido de cobalto y un ánodo de coque. Su cátodo tiene una estructura de capas y durante la descarga los iones de litio se mueven del ánodo al cátodo (por ejemplo, desde la batería a un celular). Luego, al cargar la batería, se invierte la carga.



Las baterías LCO presentan tres principales inconvenientes:

Baja estabilidad térmica

Las baterías LCO son muy reactivas y, por lo tanto, sufren de una estabilidad térmica deficiente y deben controlarse durante su funcionamiento para garantizar un uso seguro. Además, la disponibilidad limitada de cobalto, por el aparente monopolio en su producción en el Congo y las denuncias de trabajo infantil en su explotación, hace que sea más costoso e inviable el uso de este elemento como opción para vehículos eléctricos a gran escala.

Vida útil relativamente corta

Las baterías LCO tienen un ánodo de coque que limita la vida útil del ciclo al cambiar la interfaz de electrolitos sólidos, espesándose en el ánodo y el revestimiento de litio mientras se carga rápidamente y a baja temperatura. Los sistemas más nuevos incluyen níquel, manganeso y/o aluminio para mejorar la longevidad, las capacidades de carga y el costo.

Capacidades de carga limitadas (potencia específica)

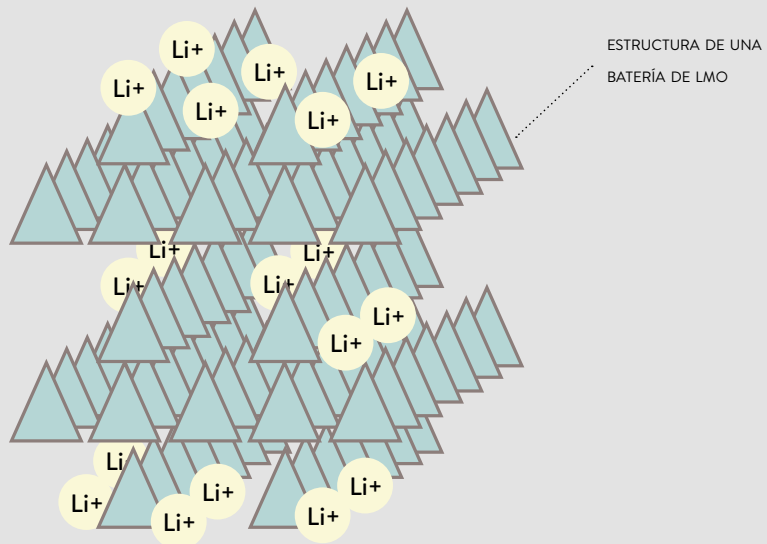
El Li-cobalto no debe cargarse ni descargarse a una corriente superior a su clasificación C. Esto significa que una celda 18650 con 2.400 mAh solo se puede cargar y descargar a 2.400 mA. Forzar una carga rápida o aplicar una carga superior a 2.400 mA provoca un sobrecalentamiento y un estrés excesivo.

2) Óxido de litio y níquel (LiNiO_2) – LN

Son baterías reconocidas por su alto voltaje, es decir, un potencial de electrodo de aproximadamente 4 V vs Li/Li^+ y por su bajo costo debido a la ausencia de cobalto. Sin embargo, su uso es complejo debido a que se forma una capa pasivante en su superficie. Además, es una batería que requiere gran cuidado durante su proceso de fabricación. Por este motivo, esta batería no fue un éxito de ventas en la industria. Pero esta tecnología fue precursora para el desarrollo de otro tipo de materiales en los cuales se incorporaría otros elementos como cobalto, hierro, manganeso, aluminio, titanio y magnesio.

3) Óxido de litio y manganeso (LiMn_2O_4) – LMO

El ion de litio con espinela de manganeso se publicó por primera vez en el Boletín de Investigación de Materiales en 1983. Posteriormente, en 1996, Moli Energy comercializó una batería de ion litio con óxido de litio y manganeso como material catódico. La arquitectura forma una estructura de espinela tridimensional que mejora el flujo de iones en el electrodo, lo que resulta en una menor resistencia interna y un mejor manejo de la corriente. La estructura cristalina del cátodo de una batería LMO se caracteriza por tener forma de espinela, que generalmente se compone de formas de diamante conectadas a una red. Una de las ventajas que genera esta estructura de espinela es una alta estabilidad térmica, lo que a su vez mejora la seguridad de la misma.



La baja resistencia interna de la celda permite una carga rápida y una descarga de alta corriente. En un paquete 18650, el Li-manganeso se puede descargar a corrientes de 20-30 A con una acumulación moderada de calor. También es posible aplicar pulsos de carga de un segundo de hasta 50 A. Una carga alta continua a esta corriente provocaría una acumulación de calor y la temperatura de la celda no puede exceder los 80°C. Esta química proporciona una mejor estabilidad térmica que las baterías LCO, pero disminuye su capacidad y vida útil en aproximadamente un 33%.

Las investigaciones sobre baterías de litio-manganeso se centran en cómo hacer combinaciones entre estos elementos con cobalto, níquel y aluminio para la fabricación del cátodo. Además, en algunas estructuras se agregan pequeñas cantidades de silicio al ánodo, lo que aumenta la capacidad en un 25%. Sin embargo, esto trae como consecuencia un

ciclo de vida más corto en la medida que la concentración de silicio crece, ya que este se contrae con la carga y descarga, lo que causa estrés mecánico.

Estos tres metales previamente mencionados (cobalto, níquel y aluminio), así como la mejora de silicio, se pueden elegir convenientemente para mejorar la energía específica (capacidad), la potencia específica (capacidad de carga) o la longevidad. Si bien las baterías de consumo tienen una gran capacidad, las aplicaciones industriales requieren sistemas de baterías que tengan buenas capacidades de carga, brinden una larga vida útil y ofrezcan un servicio seguro y confiable. La mayoría de baterías LMO se mezclan con óxido de litio, manganeso y cobalto para mejorar la energía específica y prolongar la vida útil. El LMO-NMC ha sido utilizado por múltiples fabricantes de vehículos eléctricos en el pasado, incluidos Nissan Leaf, Chevy Volt y BMW i3.

4) Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$)- NMC

Las baterías NMC son unas de las más exitosas dentro de la gama de baterías de litio. Estas se pueden diseñar para una alta energía específica o potencia con alta intensidad.

De manera similar al Li-manganeso, estos sistemas pueden adaptarse para servir como celdas de energía o celdas de poder. El secreto de NMC radica en la combinación de níquel y manganeso. Una analogía de esto es la sal de mesa en la que los ingredientes principales, el sodio y el cloruro, son tóxicos por sí solos, pero mezclados funcionan como sal de condimento y conservante de alimentos. El níquel es conocido por su alta energía específica pero poca estabilidad. Y el manganeso tiene la ventaja de formar una estructura de espinela para lograr una baja resistencia interna, pero ofrece una baja energía específica. La mezcla de níquel y manganeso varía según el fabricante y es una fórmula muy bien protegida. Los investigadores están utilizando electrodos ricos en níquel para aumentar la densidad de energía, mientras que la reducción de cobalto también es útil, ya que reduce los costos.

La combinación de níquel y manganeso mejora las fortalezas de cada uno, haciendo de NMC el sistema de iones de litio más exitoso y adecuado para trenes de potencia EV. Actualmente, estas baterías tienen una gran demanda dada la alta energía específica y las excelentes características térmicas. NMC ha sido utilizado por muchos fabricantes de vehículos eléctricos, incluidos Nissan Leaf, Chevy Volt y BMW i3.

5) Baterías de litio – ferrofosfato (LiFePO₄) – LFP

En el año 1996, un grupo de investigadores de la Universidad de Texas en Austin descubrieron que los materiales de fosfato podían usarse para fabricar cátodos para baterías de litio recargables. Las baterías LFP ofrecen un alto índice de corriente y una larga vida útil, además de una buena estabilidad térmica, mayor seguridad y tolerancia en caso de abuso. El fosfato de litio es más tolerante a las condiciones de carga completa y está menos estresado que otros sistemas de iones de litio si se mantiene a alto voltaje durante un tiempo prolongado. Por lo tanto, el fosfato ayuda a estabilizar el electrodo en caso de sobrecarga y proporciona mayor tolerancia al calor, disminuyendo la descomposición del material. Las baterías LFP tienen un amplio rango de temperatura entre +60 y -30°C, por lo

que es mucho menos probable que sufran una fuga térmica. Entre sus inconvenientes, las baterías LFP tienen una autodescarga más alta que otras baterías de ion litio, lo que puede causar problemas de equilibrio en su envejecimiento. Esta problemática puede ser superada mediante el uso de otros sofisticados dispositivos electrónicos de control, a un mayor costo de la batería. Por otra parte, la humedad también puede limitar de manera significativa la vida útil de la batería LFP. Estas baterías se utilizan a menudo para reemplazar a las baterías de arranque de ácido-plomo. Cuatro celdas LFP en serie producen 12,80 V, un voltaje similar a seis celdas de plomo ácido de 2 V en serie. Los vehículos cargan ácido de plomo a 14,40 V (2,40 V/celda) y mantienen una

carga de relleno. La carga adicional con LFP se aplica para mantener el nivel de carga completa y evitar la sulfatación en las baterías de plomo ácido. Con cuatro celdas LFP, cada celda alcanza un máximo de 3,6 V, que es el voltaje correcto de carga completa. En este punto, la carga debe desconectarse, pero la carga de cobertura continúa mientras conduce. El fosfato de litio es tolerante a alguna sobrecarga. Sin embargo, mantener el voltaje a 14,4 V por un tiempo prolongado, como lo hacen la mayoría de los vehículos en un largo viaje por carretera, podría estresar el fosfato de litio. El tiempo dirá qué tan duradero será el Li-fosfato como un reemplazo de ácido de plomo con un sistema de carga de vehículos normal. Además, es importante destacar que la temperatura fría reduce el rendimiento del ion litio, lo que podría afectar la capacidad de arranque de estas baterías en casos extremos.

Con la buena relación entre potencia y peso, las características de alta seguridad y la resistencia química a la fuga térmica, las baterías LFP están ganando popularidad para su uso en casas rodantes. Un consorcio de empresas alemanas, ElektroFahrzeuge Stuttgart y WOF, fabricaron la primera casa rodante totalmente eléctrica: el Iridium E Mobil. Se podría concluir que las baterías LFP son caras en comparación con las de plomo-ácido. Pero si se usan en aplicaciones exigentes, el alto coste inicial se verá más que compensado por una vida útil mayor, una fiabilidad superior y una mejor eficiencia.

Casa rodante eléctrica Iridium E Mobil.



6) Óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio (LiNiCoAlO_2) – NCA

La batería NCA existe desde 1999 y es utilizada para aplicaciones especiales. Comparte similitudes con NMC al ofrecer alta energía específica y potencia específica (la velocidad a la que la batería puede suministrar energía) y una larga vida útil, además de la estabilidad química que brinda el aluminio. Sin embargo, esta batería presenta menos seguridad, por lo que se requieren medidas especiales y monitoreo para su uso en vehículos eléctricos. Son más costosas en su fabricación, lo que limita su viabilidad en el uso de otras aplicaciones a nivel masivo en la industria.

Hasta la fecha, Tesla Motors Inc. es la única gran compañía que ha fabricado vehículos eléctricos con este tipo de baterías, las cuales se utilizaron en el Modelo S y Modelo 3, donde además se usaron bajas cantidades de cobalto para disminuir su coste.

7) Titanato de litio (Li_2TiO_3) – LTO

Las baterías con ánodos LTO se conocen desde los años 80. El titanato de litio (LTO) reemplaza el coque en el electrodo negativo de una batería de iones de litio típica y el material forma una estructura de espinela. El cátodo puede ser óxido de litio manganeso o NMC. El LTO tiene un voltaje de celda nominal de 2,40 V, se puede cargar rápidamente y ofrece una alta corriente de descarga de 10 C, o 10 veces la capacidad nominal. Se dice que la cuenta del ciclo es más alta que la de un ion de litio normal. El titanato de litio es seguro, tiene excelentes características de descarga a baja temperatura y obtiene una capacidad del 80% a -30°C . Este material tiene baja conductividad electrónica y el coeficiente de difusión de ion litio de este material puede dar como resultado un bajo rendimiento a altos niveles de potencia. Aunque esto puede mejorarse mediante la reducción de las longitudes de las rutas de trans-

porte de iones de litio a través de una nanoestructuración adecuada y la mejora de la conductividad electrónica a través del dopaje, el revestimiento de superficies y la formación de compuestos con mejores conductores electrónicos, como los materiales de carbono.

Las baterías LTO (comúnmente $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) tienen ventajas sobre las de ion litio mezclado con cobalto convencionales con ánodo de coque al lograr una propiedad de deformación cero, sin formación de película IES, y sin recubrimiento de litio cuando se carga rápidamente a baja temperatura. La estabilidad térmica a alta temperatura también es mejor que otros sistemas de iones de litio, aunque tiene como inconveniente su elevado costo de fabricación.

Los usos típicos de las baterías LTO son en motores eléctricos, UPS, alumbrado público con energía solar y, debido a su alto nivel de seguridad, también se utilizan en dispositivos médicos móviles.

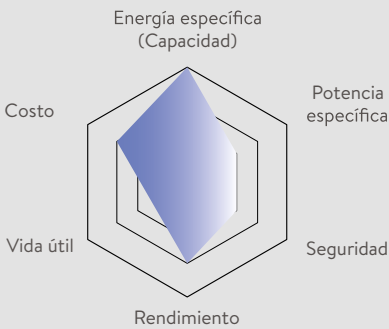
Resumen de las baterías más comunes basadas en iones de litio.

	Óxido de litio y cobalto	Óxido de litio y manganeso	Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto
Fórmula química	LiCoO_2	LiMn_2O_4	$\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$
Abreviatura	LCO	LMO	NMC
Voltaje nominal (V)	3,6	3,7	3,6
Carga completa (V)	4,2	4,2	4,2 (o más)
Descarga completa (V)	3	3	3
Voltaje mínimo (V)	2,5	2,5	2,5
Energía específica (Wh/kg)	150 - 200	100 - 150	150 - 220
Carga (Capacidad C)	0,7 - 1 (3 h)	0,7 - 1 (3 h)	0,7 - 1 (3 h)
Descarga (Capacidad C)	1 C (1 hora)	1 C, 10 C posible	1 - 2 C
Ciclo de vida (ideal)	500 - 1.000	300 - 700	1.000 - 2.000
Fugas termales (°C)	150 (más alta cuando está vacía)	250 (más alta cuando está vacía)	210 (más alta cuando está vacía)
Mantenimiento	Mantener en clima fresco; almacenar parcialmente cargado; evitar ciclos de carga completa, usar corrientes moderadas de carga y descarga		
Embalaje (típico)	18650, celda prismática y bolsa	Prismática	18650, celda prismática y bolsa
Fecha histórica en que se comercializó	1991 (Sony)	1996	2008
Aplicaciones	Teléfonos móviles, tablets, computadoras portátiles, cámaras	Herramientas eléctricas, dispositivos médicos, trenes motrices	Bicicletas eléctricas, dispositivos médicos, vehículos eléctricos, industriales
Detalles importantes	Alta energía, potencia limitada, su demanda en el mercado se ha estabilizado	Alta potencia, menos capacidad; más segura que el Li-cobalto; a menudo mezclado con NMC para mejorar el rendimiento	Alta capacidad y alta potencia, su demanda en el mercado está aumentando

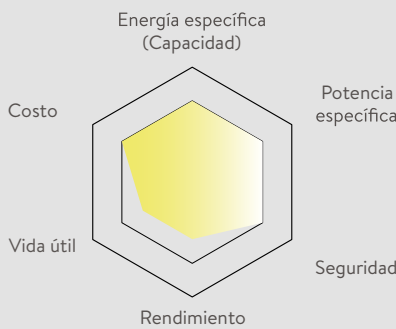
	Baterías de litio – ferrofosfato	Óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio	Titanato de litio
Fórmula química	LiFePO_4	LiNiCoAlO_2	Li_2TiO_3
Abreviatura	LFP	NCA	LTO
Voltaje nominal (V)	3,2 – 3,3	3,6	2,4
Carga completa (V)	3,65	4,2	2,85
Descarga completa (V)	2,5	3	1,8
Voltaje mínimo (V)	2	2,5	1,5
Energía específica (Wh/kg)	90 - 120	200 - 260	70 - 80
Carga (Capacidad C)	1 C (3 h)	1 C	1 C (5 C máximo)
Descarga (Capacidad C)	1 C (25 C posible)	1 C	10 C posible
Ciclo de vida (ideal)	1.000 – 2.000	500	3.000 – 7.000
Fugas térmicas (°C)	270 (segura en carga completa)	150 (más alta cuando está vacía)	Una de las baterías de iones de litio más seguras
Mantenimiento	Mantener en clima fresco; almacenar parcialmente cargado; evitar ciclos de carga completa, usar corrientes moderadas de carga y descarga		
Embalaje (típico)	26650, prismática	18650	Prismática
Fecha histórica en que se comercializó	1996	1999	2008
Aplicaciones	Estaciones con alta corriente y resistencia	Industria médica, vehículo eléctrico (Tesla)	UPS, vehículo eléctrico, alumbrado público solar
Detalles importantes	Voltaje de descarga plano, alta potencia, baja capacidad, muy seguro; auto-descarga elevada	Máxima capacidad con potencia moderada. Similar al Li-cobalto	Larga vida, carga rápida, amplio rango de temperatura y seguro. Baja capacidad, costosa

Comparación entre los diferentes tipos de baterías de ion litio utilizadas en vehículos eléctricos, considerando los principales factores que se valorizan en el mercado.

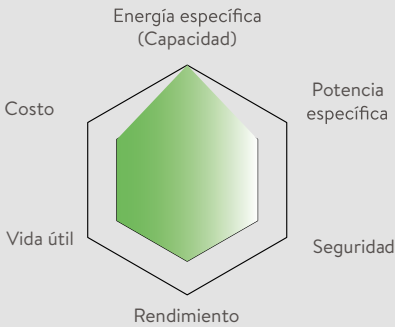
LCO



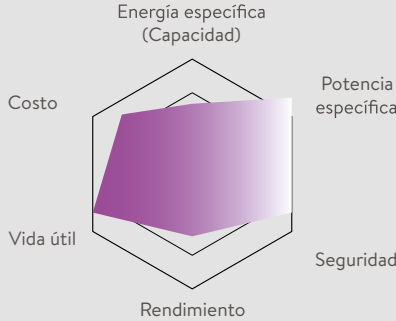
LMO



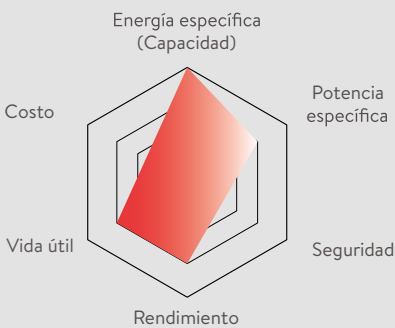
NMC



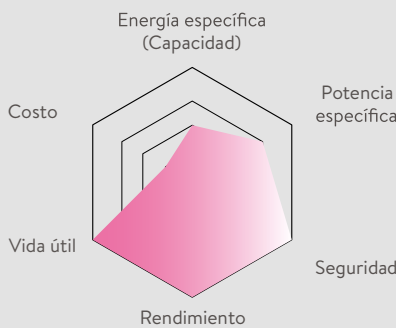
LFP



NCA



LTO



Los factores relevantes para evaluar una batería de ion litio se detallan de la siguiente manera:

- La energía específica demuestra cuánta energía puede contener una batería por unidad de peso, lo que refleja el rango de conducción.
- La potencia específica es la capacidad de entregar alta corriente bajo demanda, y demuestra el potencial de aceleración del vehículo.
- La seguridad es el aspecto más importante al elegir una batería para un vehículo eléctrico, ya que un incidente podría afectar significativamente a la opinión pública.
- El rendimiento refleja la condición de la batería cuando se conduce un auto eléctrico en condiciones de temperatura extrema.
- La vida útil refleja la duración de la batería, es decir, la cuenta del ciclo y la longevidad.
- El costo presenta la viabilidad de la tecnología, con los sistemas auxiliares necesarios para la seguridad, la administración de la batería para el monitoreo del estado de carga, el control climático para la longevidad y la garantía de 8-10 años que se suma a este desafío.

Gracias a su elevada densidad de energía, poco peso, poco espesor, falta de efecto memoria, descarga lineal y baja tasa de autodescarga, las baterías de ion litio lideran el mercado tecnológico mundial.

El ciclo actual de ciclos de carga y descarga de una batería de iones de litio es de 3.000 ciclos. El mundo de la ciencia e investigación está trabajando aceleradamente para llevarlo a 10.000 ciclos. Si este objetivo se logra, las baterías de los automóviles podrían durar hasta 25 años.



EXONI

Lithium
Carbonate

Lithium
Carbonate



En octubre de 2018 llegó un nuevo equipo directivo a la vicepresidencia de SQM Salar con la misión de conquistar ese mercado de electro-movilidad que se les escapaba de las manos. Estaba bastante claro hacia dónde tenía que apuntar la transformación: convertirse en líderes mundiales en litio grado batería. Eso significaba producir un litio con un nivel de pureza completamente distinto al litio tradicional al que estaban acostumbrados a elaborar en las plantas de El Carmen.

No había tiempo que perder. Muy rápidamente Pablo Altimiras, como vicepresidente de negocios, y Carlos Díaz, como vicepresidente de operaciones, se pusieron de acuerdo en qué tenían que hacer no solamente en el corto plazo, sino que también en el largo. Revisaron los planes productivos y de ventas con un horizonte de tiempo de diez años. Convocaron a Osvaldo Yáñez, gerente de innovación y desarrollo de SQM, a estudiar las especificaciones técnicas del litio y él entregó a Carlos Díaz y a Gabriel Meruane un plan de medidas para poder llegar a la calidad de sodio, de calcio y de partículas magnéticas que exigía el mercado de baterías.

Ya en abril de 2019 entregaron a todos los equipos del Salar y de las plantas de El Carmen un documento con las especificaciones técnicas que debían lograr en los siguientes seis meses, 12 meses y 24 meses. Y las cantidades, calidades e inversiones necesarias desde los próximos seis meses hasta los siguientes ocho años. Esta hoja de ruta determinaba cuánto era el crecimiento que querían lograr para estar a tono con el crecimiento del mercado de litio grado batería. Cuáles iban a ser las plantas nuevas que tendrían que abrir cada año y las especificaciones de calidad para cada una.

En forma paralela a aumentar la calidad, debían triplicar la producción para vender las cantidades de litio que tenían como meta. Hidrogeología debería asegurar que existieran las cantidades suficientes de salmuera y las plantas iban a crecer acorde a ello en su capacidad productiva. Un objetivo que se logró en solo tres años: de 45.000 toneladas anuales de litio vendidas en 2019 pasaron a vender más de 100.000 toneladas en 2020 y buscan alcanzar las 168.000 toneladas en 2022, mejorando de forma extraordinaria la pureza.

La clave para lograrlo fue el convencimiento de los equipos de producción y de ventas de que debían trabajar alineados tras un mismo objetivo común para sacar adelante al desfalleciente litio. Fue un cambio integral en la cultura de trabajo. Se pasó a tener a todo el sistema conectado en torno a un plan y una estrategia común. Sabían que en 2019 estarían produciendo 50.000 toneladas de litio, el año siguiente llegarían a 80.000, al siguiente a 120.000 y el siguiente a 180.000 toneladas anuales. Por lo tanto, tenían que hacer que la cadena completa funcionara en torno a ese plan. El área de producción no sacaba nada con producir si es que el área de ventas no estaba vendiendo, o si el equipo de logística no tenía los pallets o los sacos para embarcar el producto a los clientes. También el área de soporte y recursos humanos tuvo que integrarse a esta hoja de ruta, porque si la producción iba a crecer un 40% anual, se necesitaría un 20 o 30% más de trabajadores cada año en las plantas y en el Salar; había que capacitarlos, conseguirles alojamiento, ampliar el casino. En definitiva, todo el ecosistema tenía que prepararse para ese salto.

Fue un cambio de paradigma que demoró unos meses en cuajar, pero que tuvo como resultado una nueva alineación entre planta, ventas, logística, investigación e hidrogeología, que trabajaron coordinados como nunca.

Viaje de intercambio

Uno de los problemas detectados por la nueva administración fue la distancia que había entre el área comercial y la productiva. Recién llegado a su cargo en octubre de 2018, Pablo Altimiras le preguntó al equipo comercial de litio yodo cuándo fue la última vez que fueron a la planta de El Carmen. Los comerciales se encogían de hombros: “Hace dos años, en una visita con clientes”, “Hace tres años, cuando recién llegué a la empresa”. La misma desconexión se repetía del otro lado, en El Carmen. Cuando les preguntaba a los jefes de planta si habían visitado a clientes de litio grado batería, si habían visto lo limpias que son las plantas de cátodos y si habían pensando en el daño que puede causar una piedra colada en un saco de litio, la respuesta era negativa. No había mayor conocimiento de lo que ocurría con la contraparte.





En forma paralela a aumentar la calidad, debían triplicar la producción de litio. Hidrogeología debería asegurar que existieran las cantidades suficientes de salmuera y las plantas iban a crecer acorde a ello en su capacidad productiva. El objetivo se logró en tres años: de 45.000 toneladas anuales de litio vendidas en 2019 se pasó a vender más de 100.000 en 2020 y 168.000 en 2022.

El área de calidad de litio yodo que dirigía Beatriz Oelckers funcionaba como el jamón del sándwich entre el área comercial y el área de operaciones. Había solo tres personas que manejaban las discusiones cada vez más tensas con los clientes sobre las especificaciones del producto y las traspasaban al equipo de operaciones en la planta. A medida que la calidad requerida para el mercado de los autos eléctricos se hacía más demandante, se hizo común que los estresados ejecutivos de esta área llamaran a Katherinne Ricciardi, la superintendente de procesos de la planta de litio, y le pidieran con urgencia: “Kathy, tenemos que bajar el sodio a 600 ppm”. El equipo de procesos batallaba durante dos semanas tratando de llegar a esa calidad, para que al cabo de ese tiempo los mismos comerciales le dijeran: “Ya no son 600... ¡Ahora nos piden bajarlo a 400 ppm!”.

Ese tironeo constante y caótico causaba tensión entre el área comercial y la de producción. Para lograr alinear a los equipos por un objetivo común era necesario que todos conocieran las dos caras de la moneda. Que el equipo comercial entendiera las dificultades que enfrentaba la planta cuando les exigían cambiar los requerimientos de calidad. Y, asimismo, que el equipo de la planta conociera el nuevo contexto del área comercial, el tipo de cliente con que se estaban relacionando y por qué las especificaciones cambiaban a un ritmo tan frenético. Si no, continuarían en un diálogo de sordos. Como la mejor forma de entenderlo es vivirlo, a principios de 2019 Pablo Altimiras envió a un grupo grande del equipo comercial a vivir tres semanas en Antofagasta para que se instalaran todos los días en las distintas líneas de carbonato e hidróxido de litio de la Planta de Químicos de litio El Carmen. La idea era que se interiorizaran de los procesos productivos y experimentaran en carne propia la presión demoledora a la que estaban sometidos los equipos de la planta. Y en febrero de ese mismo año, por primera vez un equipo de profesionales del área de producción de El Carmen acompañó a Beatriz Oelckers durante dos semanas en sus visitas a clientes en Japón y Corea del Sur.

El grupo era variopinto y en su mayoría mujeres: ingenieros encargados de desarrollar el método de análisis de partículas magnéticas, jefas

Para alinear a los equipos era necesario que todos conocieran las dos caras de la moneda: que el equipo comercial entendiera las dificultades que enfrentaba la planta cuando se les exigía cambiar los requerimientos de calidad y que el equipo de la planta conociera el nuevo contexto del área comercial, el tipo de cliente con que se estaba relacionando y por qué las especificaciones variaban a un ritmo frenético.

de procesos, superintendentes de plantas y encargadas de envasado y embarques. Es decir, todos los que recibían reclamos de calidad en la planta.

En Corea se reunieron con el equipo de calidad de Ecopro, empresa fabricante de material de cátodos. En un gráfico les mostraron los análisis de calidad del hidróxido de litio de SQM y de otros dos proveedores. Fue demoledor. En todos los parámetros importantes para esa empresa –los niveles de sodio, de partículas magnéticas, de cloro, entre otros–, la calidad de SQM era peor. A Katherinne Ricciardi ese momento le abrió los ojos. No es que no les creyera antes a Beatriz Oelckers y a los comerciales, sino que era distinto escuchar directamente del cliente que si no mejoras tu producto, derechamente van a dejar de comprarlo.

Dos años después, esa realidad se dio vuelta. Ecopro visitó la planta de SQM en El Carmen y los coreanos los felicitaron personalmente: “Actualmente, ustedes son nuestro mejor proveedor”. Como planta fueron capaces de remontar y pasar de ser el peor a ser el mejor.

Pero en ese esclarecedor viaje de 2019, no solamente no tenían un buen producto, sino que tampoco tenían los métodos analíticos para hacer análisis de concentraciones tan bajas de las partículas magnéticas. Los mínimos de detección que manejaban en los laboratorios de SQM eran mayores a lo que sus clientes les pedían. Para conocer los métodos de medición de sus clientes y acercarse más a los valores que ellos medían, visitaron uno de los laboratorios de Ecopro. Quedaron intimidados al contrastar el estándar de ese inmaculado y equipado laboratorio coreano con el, en comparación, rudimentario recinto que tenían entonces en Antofagasta. Afortunadamente, la estandarización, protocolos y orden del laboratorio de métodos analíticos de SQM, que dirige Loverchio Gallardo, actualmente no tiene nada que envidiar a los de ese laboratorio que el equipo de planta visitó en 2019.

En Corea también visitaron a sus clientes en LG. Las tres mujeres del grupo, Kristel Willig, entonces jefa de envasado y embarques; Beatriz Oelckers, y Katherinne Ricciardi hicieron una presentación sobre lo que estaban planeando hacer para mejorar la calidad en la planta de El Carmen.

También volaron a Japón para visitar a sus clientes en Panasonic y la empresa de cátodos Niquia. Esa última reunión fue muy técnica y requirió preparación y nervios de acero de parte de los representantes de SQM, porque Niquia les estaba pidiendo una especificación de 200 ppb de partículas magnéticas y SQM estaba en 500 ppb. Estaba todo el equipo de calidad japonés, incluyendo el jefe de calidad, el jefe de laboratorio y el gerente de la planta. Tratando de armarse de valor, la comitiva de la planta de El Carmen presentó un plan para disminuir las partículas magnéticas. Katherine Ricciardi no quería comprometerse a una meta que aún no sabían exactamente cómo iban a cumplir, pero no tenían otra opción. Hoy los valores de las partículas magnéticas del litio de SQM están en 150 ppb en parte gracias a esa visita. Los técnicos de Niquia les hicieron sugerencias para que el método de detección que usaba SQM tuviera mejores resultados y hoy las partículas magnéticas metálicas se miden con el método mejorado para ese cliente.

Esa suerte de intercambio cultural entre producción y ventas marcó un antes y un después para los equipos de producción y comercial. De inmediato ayudó a hacer más fluida la comunicación entre el área comercial y las distintas áreas productivas de la planta, como procesos, operaciones y envasados. Lograr la calidad esperada no era un problema de un área en específico si no el resultado de alinearse tras un objetivo común y fue necesario reestructurar las áreas para hacer esos nexos que faltaban.

De vuelta en Chile, el equipo de calidad empezó a ir mucho más seguido a la planta, al menos semana por medio, para entender los problemas que tenían y cuáles exigencias del cliente podían ser logradas en el corto plazo y cuáles necesitaban más tiempo. Los equipos de ventas también empezaron a visitar más la planta. Como no entendían al principio las capacidades de producción de la planta para cada tipo de producto, el equipo de procesos les hizo presentaciones sobre las restricciones de la planta. Les mostraban un diagrama de la planta y les explicaban: “Si necesitan mayor cantidad de este producto, que necesita pasar por un secador, tenemos un límite de producción, que es el límite de carga del secador. Si de todos modos





Esa suerte de intercambio cultural entre producción y ventas marcó un antes y un después. De inmediato ayudó a hacer más fluida la comunicación entre el área comercial y las áreas productivas de la planta, como procesos, operaciones y envasado.

requieren más producto, se debe esperar la llegada de un secador nuevo”. Al conocer a fondo lo que significaba cada producto para la planta en términos de inversiones y costos, pudieron negociar mejor y hacerse cargo de los requerimientos de los clientes sin perjudicar a la planta.

Hasta 2019 el equipo de calidad y ventas hablaba con el equipo de la planta solo cuando había un requerimiento de calidad de un cliente. Generalmente desde la planta les respondían que no se podía mejorar la calidad y hasta ahí llegaba la comunicación. Pero a partir de ese año, las conversaciones pasaron a ser diarias y siempre para buscar soluciones en la medida de lo posible. Gonzalo Naranjo, subgerente de calidad de litio y yodo, hablaba todos los días con Katherinne Ricciardi, su contraparte como superintendente de procesos de litio, para negociar calidades. “Gonzalo, no podemos lograr esa especificación de calcio”, le decía ella. “Ya, pero hagamos algo. El calcio no lo bajes todo lo que te pido. Bájalo un poquito, pero también baja un poco más el sodio”, contraproponía él, en uno de sus tantos pequeños forcejeos en buena lid.

Fue importante mantenerse coordinados y ser flexibles para ir mejorando de a poco. Esas comunicaciones, que antes no existían, ayudaron a que fuera más fácil trabajar con la planta, a ser más cumplidores con los clientes y a saber cuándo presentarles un plan de más largo plazo si los tiempos que pedían no daban con la capacidad de la planta.

La odisea de bajar las impurezas

Las ventas de litio de SQM habían bajado drásticamente en 2018 porque el litio que producía ya no servía para las necesidades de un auto eléctrico. Ese era el meollo del asunto. La madre de todas las batallas era bajar las impurezas del carbonato y del hidróxido de litio. Eso porque la cantidad de ciclos de carga que tiene una batería depende mucho de la pureza del litio que mueve la energía en esa batería.

La batería de los celulares después de dos o tres años ya no dura cargada todo un día como al principio, se va deteriorando. Eso ocurre porque hay pequeñas impurezas como el calcio, el cloruro, el sodio, el magnesio y otros iones que compiten con el litio, menoscaban la batería y hacen que los ciclos de carga vayan durando cada vez menos y perdiendo su capacidad. En el caso de los celulares no es un problema crucial, porque la gente lo renueva cada cierto tiempo. Pero un auto eléctrico tiene un ciclo de vida más largo, de por lo menos diez años. Y se espera que durante ese tiempo mantenga la batería en buenas condiciones y sin perder autonomía de kilómetros. Las expectativas sobre un auto eléctrico son las mismas que las de cualquier otro auto, e incluso mayores, porque son más costosos.

Para que los tiempos de carga sean rápidos y estables en el tiempo, el litio que va dentro de la batería de un auto eléctrico tiene que ser de muy alta pureza. Los contaminantes no se miden en porcentaje, sino que en otras unidades de medida llamadas ppm o ppb, que son partes por millón o partes por billón. Son tan pequeñas, que todos los días SQM está diseñando junto a sus clientes métodos de medición para especificaciones de calidad cada vez más exigentes.

Lograr el estándar de pureza del mercado de electromovilidad a fines de 2018 parecía una misión imposible. Cuando Gabriel Meruane llegó a hacerse cargo de la investigación y procesos del litio a principios de 2019, se encontró con que la especificación interna que tenía SQM era de 600 ppm de sodio y además tenían un 30% de producción en la defectuosa

Armaron equipos internos para resolver el problema de las impurezas, buscar las causas y trabajar en forma conjunta para alcanzar los objetivos. De los operadores de planta, los laboratoristas y los equipos de procesistas salió gran parte de las soluciones para disminuir las impurezas.

ampliación de la planta de carbonato de litio, que ni siquiera era capaz de cumplir con el límite de 600 ppm. El estándar chino con el que competían era de 250 partículas por millón de sodio. ¡Prácticamente había que hacer la planta de nuevo para llegar a ese estándar!

Estaban a contrarreloj. Por eso la prioridad en esos primeros meses fue encontrar soluciones simples que se pudieran implementar rápidamente. Tenían que buscar velocidad, porque no había tiempo para desarrollos demorosos o sofisticados.

Meruane y su gente empezaron a preguntarles a los distintos equipos de las plantas de El Carmen, a procesistas, operadores y jefes de turno: ¿Qué harías tú para bajar el sodio? ¿Te acuerdas de alguna ocasión en que el sodio haya estado más bajo?

Armaron equipos internos para resolver el problema de las impurezas, buscar las causas raíz y trabajar en forma conjunta para poder lograr los objetivos. De los mismos operadores de planta, de los laboratoristas y del “penseque” de los equipos de procesistas salió gran parte de las soluciones para disminuir las impurezas.

Fue un cambio cultural y de mentalidad. Antes, cuando les preguntaban si se podía mejorar la calidad, los equipos de procesos decían que no, porque significaría cambiar todo, pensar en otra planta, arriesgarse con inversiones que quizás no iban a funcionar. Pero ahora el riesgo más importante era que si no cambiaban, se quedarían sin poder vender su litio.

La urgencia en que se encontraban desactivó los miedos y aceleró la creatividad. Así fueron apareciendo oportunidades de mejora: una llamada por *WhatsApp* de Katherine Ricciardi a Gabriel Meruane y Osvaldo Yáñez, que estaban en China, para contarles una idea de su equipo para bajar el sodio; un jefe de turno que decía “una vez hicimos tal cosa y bajó el sodio”; un ingeniero que había trabajado en la competencia y que decía “la otra vez probamos un proceso que figuraba en informes que obtuvimos de unos productores chinos”. De inmediato empezaron a probar las ideas que salían de los mismos viejos de las plantas. Algunas funcionaban y otras no. Avanzaban a punta de ensayo y error.

Con pequeños cambios empezaron a notar grandes transformaciones.

La misma planta que en 2018 no permitía sacar la producción con la calidad que se necesitaba, en 2020 tenía sobre el 90% del producto dentro de la especificación, mucho más exigente que la de dos años atrás.

Un cambio simple, pero que generó un gran impacto fue lavar la impregnación del carbonato de litio dos veces, inspirados en los procesos de la planta de nitrato de potasio, a 200 kilómetros de distancia, en Coya Sur. Para producir carbonato de litio tenían dos tipos de equipo de lavado, unos filtros de banda y una centrífuga. A veces pasaban el producto por uno y otras veces por el otro. Decidieron copiar el sistema que tenían en la planta de nitrato: pasar el carbonato de litio primero por los filtros de banda y después lavarlo en la centrífuga. “¿Para qué? Si ya lo lavamos una vez, va a quedar igual”, dijeron algunos. Los defensores de la idea respondieron que si uno lava la ropa dos veces le saca más el detergente.

No perdían nada con probar. Los procesistas hicieron la prueba en el laboratorio y resultó fantástico. El sodio bajó de 600 a 400 ppm solamente por hacer ese cambio en la forma de lavar. Entusiasmados, lo implementaron en la planta. Como necesitaban resultados rápidos, primero lo hicieron con una sola centrífuga, conectada con tuberías transitorias. Lo probaron y de inmediato el producto mejoró en forma importante. Cuando vieron que funcionaba, decidieron implementar ese sistema en todas las máquinas. Tuvieron que cambiar la forma en que estaba conectado el sistema en la planta y eso se demoró hasta finales de 2019. Fue la primera gran transformación, que simbolizó también el cambio de mentalidad en la planta: los mismos equipos de antes, pero conectados de otra manera.

Con esos pequeños cambios empezaron a notar grandes transformaciones. Entre marzo y agosto de ese año, el sodio que tenían en 600 ppm ya había bajado a 400 ppm. Después, el año siguiente pasaron a 300 y hoy se está en la pelea para tratar de estabilizarlo en 250 y ya se han logrado los primeros lotes de carbonato de litio que están en 200 ppm de sodio. Prácticamente con la misma planta que en 2018 no permitía sacar la producción con la calidad que necesitaban, en 2020 ya tenían sobre el 90% del producto dentro de la especificación, que era mucho más exigente que la de dos años atrás. Lo que al principio parecía una especie de brujería por parte de los competidores, terminó siendo un problema técnico para el que había que buscar soluciones distintas de lo que habían hecho siempre.

En la etapa de cristalización tenían otro problema que no sabían cómo resolver. Cristalizaban sales con carbonato de calcio y con carbonato de sodio que contaminaban el producto. Le plantearon este problema a un industrial en Estados Unidos que quería venderles equipos nuevos. Él les dijo que una buena opción era diluir la mezcla con agua.

Al escuchar esta propuesta, los procesistas de El Carmen se vieron en un aprieto. No podían gastar más agua, que era un bien preciado y escaso en la planta. ¿Con qué podían reemplazar el agua? Se les ocurrió usar el licor madre que salía de los procesos de cristalización de la planta de carbonato de litio. Es una solución residual, con un poco de sal, que ya no tiene litio y que en parte se reciclaba y en parte se mandaba a pozas de descarte líquido, para ser evaporado. Con una simple manguera y una bomba pequeña el jefe de la planta tomó parte de esa solución y la devolvió a la entrada de los cristalizadores, para diluir la mezcla de manera artesanal, al ojo, solo para ver de forma rápida qué pasaba.

Desde la salida del decantador el jefe de planta tiró la manguera hacia el estanque donde estaba el carbonato de litio. Los operadores que miraban este improvisado experimento estaban asustados de que se contaminara el producto y quedara la escoba. Gabriel Meruane lo animó: “¡Dale no más! Si no funciona, sacamos la manguera”. El chorro de licor madre inundó el estanque lleno de carbonato de litio durante un buen rato. Una vez diluido, llevaron corriendo las muestras al laboratorio y celebraron al comprobar que había bajado el nivel de contaminación con sales del carbonato de sodio y calcio. Solo con una manguera del patio, el experimento funcionó perfectamente.

Después, el equipo de proyectos estandarizó dicha manguera con bombas centrífugas de control, flujómetro y un estanque a la medida para hacer las diluciones precisas para bajar los contaminantes.

También hicieron algunos ajustes a la etapa de lavado, implementando un sistema de lavado de contracorriente en la centrífuga, a partir de 2019 en la planta de carbonato de litio y de 2021 en la de hidróxido de litio. Los cristales antes pasaban directamente a la centrífuga y después al

secador. Ahora pasan por una centrífuga, se les hace un nuevo lavado en un estanque y luego vuelven a alimentar la centrífuga. Ese pequeño cambio permitió eliminar solo con agua los contaminantes solubles que quedaban en el producto y que son el cloro, el sodio y el sulfato. Ayudó a bajar gradualmente los niveles de cloro desde 140 ppm a 30 ppm, y el sulfato a 70 ppm, que son valores que permitieron volver a ser competitivos en el mercado mundial del litio para baterías.

La mayoría de las mejoras salieron del equipo de operaciones, producción y mantenimiento liderado por Humberto Carvajal. El trabajo en equipo fue clave para poder llevar esas ideas que traían los químicos en la cabeza, a la práctica. Después de todo, los mismos mecánicos, técnicos y operadores eran quienes conocían mejor la planta y sabían qué hacer, cómo se podía implementar, en qué estanque se podía probar cada nueva idea o locura que surgía. Al trabajar juntos, la solución terminaba apareciendo.

Otro problema que tenían en la planta de hidróxido de litio era que el carbonato de litio seco que usaban como materia prima llegaba con un alto porcentaje de cloro. Heber Espíndola, jefe de planta de la línea tres de hidróxido, conversó con un procesista, que sugirió la idea de lixiviar el carbonato con agua, para que los sólidos decantaran, el agua quedara arriba y el cloro, que es soluble, se fuera con el agua. Luego esa agua se eliminaba y se rellenaba de nuevo la mezcla con agua, para lavarla. En el mismo patio donde preparaban las pulpas de carbonato de litio para la planta de hidróxido, los operadores hicieron la primera prueba, con una simple probeta. La dejaron decantando durante una hora en una esquina mientras ellos hacían sus tareas del turno. Cuando los sólidos precipitaron al fondo de la probeta, botaron el agua de la lixiviación, le agregaron agua limpia, lo revolviaron y mandaron una muestra al laboratorio. Ahí comprobaron que el cloro había bajado un 20 o 30%. Después de varias pruebas los ingenieros de procesos hicieron un diseño simple para llevar esa innovación a escala de planta.

Una idea calcada de las plantas de nitrato de Coya Sur que no solo significó una gran mejora, sino un cambio de paradigma, fue integrar las plantas de carbonato de litio y la de hidróxido de litio. Ambas plantas están

una al lado de la otra y siempre han sido interdependientes. La planta de carbonato de litio alimenta a la planta de hidróxido de su principal materia prima, el carbonato de litio. Sin embargo, no existía una conexión directa entre ambas plantas porque los números e insumos eran administrados por separado. Todo el carbonato de litio que se enviaba a la planta de hidróxido de litio pasaba por el proceso completo de secado, envasado, transporte, bodega, contabilidad y auditoría, antes de entregar la materia prima en forma de sacos de carbonato de litio a la planta de hidróxido. Ese carbonato de litio seco tenía que ser diluido con agua y otros ingredientes en la planta de hidróxido de litio para preparar la química de la mezcla para la reacción con el hidróxido de calcio.

El simple hecho de saltarse esa burocracia innecesaria y añadir una tubería entre ambas plantas para enviar a la planta de hidróxido un carbonato de litio sin terminar, en forma de pulpa húmeda, mejoró notablemente la productividad de ambas. A la planta de hidróxido de litio llegaba un producto prefabricado, con el porcentaje de sólido y química que necesita la planta y que demoraban la mitad del tiempo en preparar. Igualmente, gran parte de las purgas de las plantas de hidróxido tienen litio y se envían de regreso a las plantas de carbonato para recuperar ese valioso metal. Están unidas en un circuito cerrado, como una sola gran planta, de una manera muy similar a como se hizo en Coya Sur. Las tres plantas de nitrato de potasio de Coya Sur funcionaban de forma muy similar, todas separadas, y actualmente son un solo complejo o circuito de producción conectado. La misma lógica se aplica ahora con el litio en El Carmen, todas las plantas están integradas para optimizar la eficiencia. Se antepone el objetivo común por sobre los indicadores de cada planta y en forma creativa aparecen sinergias que eliminan desperdicios y mejoran el resultado.

De esta manera se redujeron enormemente los costos y tiempos de producción, ya que se enviaba directamente la materia prima por un tubo a la planta de hidróxido. Fue una medida que solo demoraron dos meses en implementar y que sigue funcionando tal cual.

Todavía llegan sacos de carbonato de litio a la planta de hidróxido

Uno de los proyectos más ambiciosos para disminuir el consumo de agua es la planta de recuperación de salmuera o PRS, que procesará las soluciones líquidas que salen de las plantas y las evaporará para recuperar ese vapor como agua destilada y así generar un circuito de reutilización.

que son utilizados cuando escasean los traspasos desde la planta hermana de carbonato o cuando la pulpa viene con menos sólidos de los que necesita la planta y se debe ajustar la mezcla. También se alimenta a la planta de hidróxido el producto fuera de especificación de carbonato, aumentando el valor total de la producción y el resultado financiero. Algo que no pueden realizar otros productores de Sudamérica.

Lo más difícil de la lucha por bajar las impurezas es que en ese mismo período también hubo que aumentar la producción a más del doble. Cuando se aumenta la producción en una planta grande lo normal es que haya disminuciones de calidad. Pero aquí el desafío fue crecer en producción y en calidad con una planta ya existente. Calibrar ambas cosas se logró paso a paso. Si no resultaba un proceso nuevo, se volvía atrás. Se mantenía la producción, que no se podía enlentecer nunca. Pero buscaban de nuevo cómo mejorar la calidad en la partida siguiente. Y la siguiente. Porque el mercado siempre requería más.

Otro foco importante que sigue en pleno desarrollo es la disminución de los consumos de agua de la planta de carbonato y de hidróxido de litio, para trabajar con la mínima cantidad de agua posible y cumplir las metas medioambientales de SQM.

Uno de los proyectos más ambiciosos en este sentido es la planta de recuperación de salmuera o PRS. Es una planta evaporadora que va a recuperar el licor madre que sale del proceso de la planta de carbonato de litio y que se acumulaba en las pozas de descarte de El Carmen porque no se podía reutilizar. La planta de recuperación de salmuera está tomando todas las soluciones líquidas que salen de las plantas, las evapora y recupera ese vapor como agua destilada. Esa misma agua vuelve al proceso de las plantas y así se genera un circuito de reutilización del agua. Al entrar en operación en 2023, ha permitido reducir el consumo de agua de las plantas en casi la mitad, generar menos descartes líquidos y aumentar el rendimiento global de litio.

La guerra contra las partículas magnéticas

La lucha contra las partículas magnéticas metálicas ha sido uno de los mayores quebraderos de cabeza para las plantas de litio de SQM. Las especificaciones exigidas por el mercado de electromovilidad para las partículas magnéticas actualmente son de 50 unidades por billón. Es decir, en un billón de unidades apenas puede haber 50 unidades de partículas magnéticas. O 50 miligramos por tonelada. La razón de tanta meticulosidad es que estas minúsculas partículas de metal potencialmente pueden alinearse en ciertos lugares de la batería y generar un puente eléctrico que haga cortocircuito. Se trata de un problema de las baterías de alta carga que hasta hace pocos años no se conocía y que pasó a ser una exigencia inexcusable para el mercado de baterías.

Cuando los clientes japoneses comenzaron a exigir ese estándar en la planta de El Carmen ni siquiera tenían los métodos para detectar esas cantidades tan ínfimas de partículas magnéticas metálicas en sus productos. Más encima, esas mismas partículas abundan en el desierto, y el viento las movía por lo que inevitablemente terminaban colándose en la planta de El Carmen, en las afueras de Antofagasta.

La planta está en un terreno junto a la carretera rodeado de desierto y en la tarde se levantan unos remolinos de viento y polvo, llamados “búfalos” por los viejos de SQM, porque desde lejos se ven como una manada de animales bajando por los cerros. Los búfalos dejaban las plantas y los patios llenos de tierra. Arrastraban partículas magnéticas, cobre y otros contaminantes que ensuciaban las materias primas usadas en los procesos, como el agua ultra purificada y las salmueras. Este era un tema de tanta importancia que se debía registrar en el sistema de control el grado de intensidad de los búfalos, que estaban catalogados de 1 a 5. Este último grado equivalía a una tormenta de arena que impide toda visibilidad. Si llegaba algún reclamo de cliente, con ese registro se podía cruzar la información y detectar si los búfalos eran los responsables.

Para disminuir el efecto de los búfalos se trabajó en mantener los

caminos interiores y los alrededores de la planta más compactados. Los procesistas de El Carmen aplicaron una idea que sugirió el equipo de operación de pozas del Salar de Atacama, que ya estaba acostumbrado a lidiar con máquinas que movían tierra. Plantearon usar el regadío como mecanismo de control de los arrastres de tierra por vientos y aplicar una mezcla precisa de soluciones con sales y otros elementos disponibles en el Salar de Atacama que ayudaban a mantener por más tiempo la humectación del terreno y evitaban que se levantara polvo. Funcionó como una primera barrera de mitigación.

El equipo de investigación y procesos además instaló cerca de 200 imanes por toda la planta de El Carmen, con la esperanza de que funcionaran como trampas para atrapar a estos elementos metálicos indeseados. Después de un tiempo notaron que varios de esos imanes estorbaban más que ayudar y los sacaron. Pero aún quedan alrededor de 100 imanes que cumplen un rol importante para capturar estos micrometales.

También encapsularon las plantas de cristalización de litio, que ahora son completamente cerradas, y se sellaron todas las áreas que podían estar expuestas a estas nubes de polvo para evitar la contaminación en los productos. También instalaron filtros de aire en los secadores, en los sistemas de molienda y en otras instalaciones de las plantas que ayudaron remover las partículas magnéticas de manera incluso más eficiente que los imanes.

Todas esas medidas solucionaron el problema de los búfalos y redujeron en gran parte el porcentaje de partículas magnéticas metálicas en los productos. Pero estas partículas siguen siendo un desafío. Actualmente, más del 80% son causadas por elementos extraños o roces metálicos generados en la misma operación y que son difíciles de detectar: puede ser un tornillo que está rozando con su canoa de traspaso, o un rodamiento dañado que pierde un poco la inclinación y empieza a rozar en alguna parte con otro equipo. Incluso puede ser un perno o una tuerca suelta que cayó dentro del sistema. La generación de partículas magnéticas viene de la mano de cualquier elemento extraño que pueda entrar dentro del circuito o en la fricción de fierro con fierro. Es complejo de solucionar porque los equipos no avisan



17

Laboratorio Salar
PROYECTOS

18

Laboratorio Salar
PROYECTOS

19

Laboratorio Salar
PROYECTOS

50ml

cuando van a empezar a generar partículas magnéticas. Otros contaminantes como el calcio, el magnesio, silicio o cloro se pueden detectar a través de los controles rutinarios que tiene la planta y los análisis de laboratorio. Pero ese no es el caso de las partículas metálicas.

Con todos los ajustes y mejoras a los procesos hoy se obtiene un hidróxido de litio de 99,9% de pureza y un carbonato de litio de 99,5% de pureza, con las partículas magnéticas en rangos de entre 200 y 150 partículas por billón. El sodio está en rangos bajo los 300 ppm, el calcio bajo 90 ppm y el cloro bajo 40 ppm. A marzo de 2022, el 80% de la producción de litio en la planta de El Carmen es grado premium para baterías y el resto se destina a distintos usos industriales.

El siguiente desafío es el que están trabajando los procesistas de SQM Salar es en llevar el carbonato de litio a un grado de pureza del 99,8%. Eso significa bajar el sodio a 50 ppm y el calcio hasta 20 ppm. Todas las especificaciones de contaminantes tienen que continuar disminuyendo porque esa pureza de 99,8% en el carbonato de litio será la exigencia para las baterías de alta carga en 2025. Desde ya se están preparando para tener las soluciones técnicas listas.

Para alcanzar esos niveles de pureza tendrán que modificar las plantas. Actualmente el área de investigación está probando un rediseño del sistema de cristalizadores con especialistas de Estados Unidos y de Suiza. También están trabajando en crear procesos de purificación que disuelvan el producto y lo vuelvan a cristalizar. Esos son los grandes desafíos que vienen para los próximos tres años. Es un nuevo paradigma al que los equipos de SQM Salar ya se acostumbraron: no pueden esperar a que ocurra un cambio sino que deben anticiparse a los futuros posibles y estar preparados desde antes para las nuevas exigencias de un mercado vertiginoso.

Mejorar los rendimientos en el Salar

Mientras las plantas de El Carmen aceleraban su capacidad de producir más litio, en el Salar de Atacama el desafío era doble: estar a tono con la mayor cantidad de salmuera concentrada en litio que requería la planta y a la vez disminuir los flujos de extracción de salmuera para cumplir las metas de sustentabilidad. En resumen, tenían que producir más extrayendo menos. La única manera de lograrlo era optimizar la concentración de litio que obtenían de la salmuera.

El área de hidrogeología disminuyó la cantidad de pozos productivos activos y se enfocó en explotar los llamados “pozos preferentes”, que eran los que tenían mejores concentraciones de litio en el Salar. El cloruro de potasio y el sulfato de potasio, que hasta cinco años atrás eran los productos principales, pasaron a ser secundarios y toda la prioridad la tuvo el litio.

El área de operaciones del Salar, a cargo de Gilbert Maldonado, se concentró en aumentar el rendimiento de las pozas de evaporación, un problema que ha sido histórico en la operación del Salar de Atacama. Entre un 60 y 40% del litio se perdía en distintas etapas del proceso de pozas. Quedaba impregnado en las sales cosechadas o precipitaba como carnalita en las pozas de carnalitas de litio, en la etapa más avanzada del proceso de evaporación.

Para recuperar parte de ese litio retenido en las pozas, el equipo de operaciones comenzó a implementar distintas medidas. Una de ellas fue cosechar esas sales de carnalita de litio y lixiviarlas con agua y soluciones diluidas en estanques agitados. En el caso de las bischofitas impregnadas en litio, se comenzó a regar suavemente sobre plataformas de lavado, para recuperar ese litio en estado líquido y enviarlo de vuelta a concentrarse en las pozas. También mejoraron el proceso de extracción de sales. Los camiones para cosechar las sales de las pozas, que antes eran de 20 toneladas, fueron reemplazados por camiones de 60 toneladas, más eficientes. Con pequeños ajustes al secado de sales, haciendo más zanjas, acordonando de mejor forma la sal y agregando más bombas para el traspaso de la salmuera

Diariamente se controlan las variables de meteorología en las pozas de evaporación con estaciones meteorológicas automatizadas. Este monitoreo se completa con muestras semanales para comprobar cómo el sol y otras condiciones climáticas afectan la calidad química de las salmueras. También tienen controles semanales de geomensura y de sal en cada una de las pozas.

de una poza a otra, lograron recuperar más salmuera impregnada en las sales cosechadas y devolverla a las pozas para volverlas a concentrar por evaporación.

También mejoró la técnica de construcción de pozas para evitar que ocurrieran pérdidas por filtración. Hoy las pozas están impermeabilizadas con una capa de plástico HDPE, por otra capa de geotextiles y una capa gruesa de halita del mismo salar, para fortificar y darle un mayor sellado a los pisos y evitar que el peso de camiones y cosechadoras dañen los textiles impermeabilizantes.

El área de operaciones del Salar incorporó tecnologías para mejorar los procesos, monitorear y tomar buenas decisiones a tiempo. Implementaron *softwares* de visualización de datos con *dashboards* para seguir en línea los indicadores de producción de las plantas, de la extracción de salmuera en los pozos, de las químicas de la salmuera en las pozas de evaporación solar y de los resultados que iban saliendo de los controles de muestras en los laboratorios. Diariamente se empezaron a controlar las variables climáticas en las pozas de evaporación con estaciones meteorológicas automatizadas. Es decir, las tasas de evaporación, la velocidad del viento, la radiación solar y las temperaturas. Este monitoreo hoy se completa con muestras que se toman todas las semanas para comprobar cómo el sol y otras condiciones climáticas afectan la calidad química de las salmueras. También existen controles semanales de geomensura, que miden los niveles de salmueras y de sal en cada una de las pozas.

Con todas estas mejoras año a año ha ido creciendo el rendimiento de las pozas de evaporación para poder despachar a El Carmen cantidades de salmuera suficientes para producir 180.000 toneladas de carbonato de litio equivalente. También se está preparando el terreno para cumplir con las metas de producción de salmuera para los próximos ocho años y alcanzar gradualmente las 240.000 toneladas anuales.

De un pequeño buque a un gran transatlántico

Hasta 2018 la Planta de Químicos de litio El Carmen era un pequeño buque que marchaba a un ritmo productivo de 40.000 o 50.000 toneladas anuales. Desde entonces el conjunto de plantas ha crecido en capacidad e infraestructura hasta ser comparable a un transatlántico, con las turbinas y aspas exigidas al máximo y los fierros amarrados de la manera más eficiente para llegar a puerto sin contratiempos. Las dos plantas originales de hidróxido y carbonato de litio se ampliaron a seis líneas de carbonato de litio y tres líneas de hidróxido de litio, con una capacidad de producción conjunta que supera las 180.000 toneladas de carbonato de litio equivalente.

Con sus ampliaciones recientes, la planta de El Carmen actualmente se sitúa como la planta de productos de litio más grande del mundo, por lejos. De sus bodegas salen todos los días 25 camiones cargados de carbonato e hidróxido de litio para ser embarcados a puertos de los cinco continentes. En total, entre un 20 y un 25% del mercado mundial de litio es producido en esta megaplanta de SQM.

A largo plazo el plan de producción es crecer lo suficiente para producir dos millones de toneladas al 2030, porque se proyecta que el mercado va a estar a ese nivel de demanda. Cuando partió la expansión acelerada de El Carmen hace tres años, la planta de carbonato de litio tenía tres líneas de producción, que correspondían a las plantas antiguas, de más de 20 años de antigüedad. Empezaron a hacer la línea cuatro de carbonato en 2019, para totalizar 70.000 toneladas anuales de capacidad y cuando comenzó la pandemia, en marzo de 2020, estrenaron la línea cinco, que apuntaba a un total de 120.000 toneladas de capacidad. Actualmente están en construcción las líneas seis y siete, para llegar a un total de 180.000 toneladas y posteriormente se va a ampliar a una línea más para llegar a las 240.000 toneladas anuales, para buscar esa meta final de dos millones de toneladas de litio equivalente para 2030. Paralelamente, sigue en operaciones la línea uno de hidróxido de litio, que es la planta antigua de 2006. Ya entraron en operación las líneas dos y tres, y se está construyendo la

línea cuatro de hidróxido de litio, que estará lista este año. También está en proyecto construir una línea cinco de hidróxido de litio.

El aumento acelerado de producción ha exigido a las viejas y nuevas plantas casi hasta sus límites de capacidad. Un contenedor de 20 metros cúbicos que trataba 100 metros cúbicos de carbonato de litio ahora trata volúmenes de 300 metros cúbicos. O una bomba que hace un año bombeaba 140 metros cúbicos, ahora tiene que bombear 300 metros cúbicos. Los operadores se han visto obligados a aprender a aumentar el flujo de la bomba, pero sin llevarla más allá de su máxima capacidad para que no presente fallas. Es un trabajo que requiere estar extremadamente atento a la mantención y capacidad de los viejos equipos.

Para llevar mejor el control de todas las plantas, a partir de 2019 implementaron *softwares* de visibilidad de datos, con *dashboards* que muestran en línea las curvas de producción día a día de las siete líneas productivas de la planta y además las desviaciones y emergencias para detectarlas y corregirlas rápidamente.



El ensacado del carbonato de litio, que hasta 2022 se controlaba manualmente, hoy es un proceso automatizado en las plantas de El Carmen.

No solo creció la infraestructura. La dotación de las plantas aumentó a más del triple. Cerca de 1.500 personas trabajan en una planta que es del tamaño de una pequeña ciudad, llena de áreas con conos naranjos que demarcan las zonas en construcción. Todo tuvo que cambiar de escala.

La antigua sala de control de cada planta, que funcionaba de manera manual y con controles en terreno realizados por los mismos operadores, fue reemplazada por centros de mandos computarizados. Las variables químicas, niveles de estanque y todas las etapas de la planta completa pasaron a ser controlados por indicadores en línea por ingenieros.

Las ampliaciones y plantas nuevas automatizadas funcionan en conexión con la planta antigua de carbonato de litio, de 1996, que no ha parado de producir y tiene que ser adaptada a lo nuevo. La planta antigua aún tiene tarros pequeños de 30 metros cúbicos, bombas que funcionan con control en terreno y motores que dependen del manejo manual de los operadores. El ensacado del carbonato de litio, por ejemplo, hasta 2022 se controlaba manualmente y hoy es un proceso automatizado en El Carmen, incluidas las nuevas plantas y las ampliaciones. Mientras se moderniza esa planta gradualmente, sus equipos más antiguos siguen funcionando. No se abandonan las plantas antiguas, porque la demanda por más y más carbonato de litio simplemente no lo permite.

No solo creció la infraestructura. La dotación de las plantas aumentó a más del triple, con aproximadamente 1.500 personas trabajando en una planta que ya es del tamaño de una pequeña ciudad, llena de áreas con conos naranjos para demarcar las nuevas zonas en construcción. Todo tuvo que cambiar de escala. En El Carmen había un solo jefe de planta que tenía a su cargo las dos plantas, la de carbonato y la de hidróxido, y cuatro jefes de turno en cada una. Ahora hay un superintendente para la planta de carbonato y otro para la de hidróxido. Los turnos que antes eran de 13 operadores, ahora son de 30 operadores. Las líneas de envasado actualmente son cinco y se van a construir dos líneas más. Si antes entraban diariamente a la planta cuatro camiones con ceniza de soda y 15 camiones con salmuera, hoy el movimiento en El Carmen es de más de 100 camiones por día. Fue necesario coordinar el movimiento de los camiones con GPS y generar rutas, estaciones y romanas para evitar que se congestionen las entradas y salidas de la planta. Todo tuvo que adaptarse al crecimiento imparable del negocio del litio.



Con todos los ajustes y mejoras a los procesos hoy se obtiene un hidróxido de litio de 99,9% de pureza y un carbonato de litio de 99,5% de pureza, con las partículas magnéticas en rangos de entre 200 y 150 partículas por billón. El sodio está en rangos bajo los 300 ppm, el calcio bajo 90 ppm y el cloro bajo los 40 ppm. A marzo de 2022 el 80% de la producción de litio en la planta de El Carmen es grado premium para baterías y el resto es para distintos usos industriales.



Optimizar el envasado y despacho

Cuando llegó a hacerse cargo del área de envasado y despacho a principios de 2020, Germán Pérez, gerente de supply chain de potasio litio, se encontró que en esta etapa, la última de la cadena, se generaban gran parte de las quejas de los clientes.

Antes de llegar a este paso final, el equipo de hidrogeología se ha preocupado de extraer las salmueras del Salar, que han sido concentradas durante más de un año en pozas de evaporación y han sido enviadas en camiones de la Planta de Químicos de litio El Carmen donde han sido procesadas en sus plantas. Si el producto final queda mal envasado o se estropea durante el embarque, todo el trabajo de esta larguísima cadena queda inservible.

En una planta que envasaba 60.000 toneladas anuales (equivalentes a 80.000 maxisacos) de un producto de litio grado industrial, la satisfacción de los clientes era de un 75%. Es decir, de cada 100 toneladas que se despachaban, 75 llegaban bien a su destino y 25 llegaban mal. Se embolsaban, al igual que hoy, en maxisacos de hasta 1.500 kilos, sobre pallets. Pero había poco cuidado con el producto en la bodega, en el embarque y en el contenedor. En más de una ocasión el equipo comercial de SQM en China o Japón había tenido que deshacerse en disculpas con un cliente porque había llegado una tuerca o una piedra dentro de un saco. Esas situaciones ya era inaceptable que ocurrieran, sobre todo en ese momento en que la producción estaba transitando de un litio de calidad industrial a uno que mayoritariamente era de grado batería, de alta pureza y cuyo envasado y despacho debía ser en extremo cuidadoso.

Para alcanzar esa meta, lo más importante consistió en el trabajo que se hizo con los trabajadores. En ellos se centró toda la comunicación acerca de los objetivos y del trabajo en equipo, porque ellos eran los que estaban envasando el carbonato de litio al final de la cadena. Todo dependía de ellos hasta que se automatizó el proceso en 2022.

En 2019 la planta envasaba y despachaba 220 sacos por día. Cada

uno de esos sacos pasaba por un control de calidad manual. Un operador tenía que llevar el saco en una grúa, pesarlo y sacar una muestra para el laboratorio. En ese proceso siempre había reclamos porque la exactitud del peso es muy importante para los clientes del mercado de baterías y de cátodos. Muchos productores asiáticos tienen plantas automatizadas donde necesitan que el saco les llegue con exactamente los 500 kilos prometidos. Si pesa 499 o 501, puede provocar un problema en su planta. Actualmente la producción es de 800 maxisacos al día y ese mayor volumen ha sido un desafío para un área donde la calidad se juega en un minucioso y repetitivo control manual. Fue necesario reorganizar toda la operación. Trabajaron casi un año y medio con una consultoría para cambiar los procesos y mejorar la productividad del área de envasado y despachos.

La planta de El Carmen tiene 11 líneas de envasado para distintos productos micronizados, finos y de cristales. El estándar de envasado del producto adentro del contenedor es un pallet como base, una placa de cartón, el saco y una capucha plástica como cubierta. Los contenedores son enviados sellados desde la planta y con un sello de SQM que garantiza que el producto se está sacando desde la planta con la carga correcta y que no se volverá a abrir el contenido hasta su llegada al puerto de destino. Para volver más eficiente este proceso, fue dividido en etapas, por estaciones. Actualmente hay trabajadores que solo envasan, otros que solo trasladan los sacos en grúas, y otro grupo que se encarga de despachar el lote adentro de los contenedores. De esta manera se pueden hacer controles de calidad dentro de la misma línea del proceso. Antes de implementar este sistema, el trabajador hacía el proceso completo con una grúa y se demoraba más del doble de tiempo. Cargar un camión demoraba dos horas. Al dividir el mismo trabajo en estaciones, se acortó el tiempo a 55 minutos.

A Germán Pérez le tomó un tiempo entender que los viejos se veían a sí mismos como mineros de la pampa, no como trabajadores del área de logística. Tuvo que mostrarles cómo hacer ese cambio de foco.

Era otra la lógica y cuando lo empezaron a entender, los procesos y controles internos fueron más eficientes y les empezó a sobrar el tiempo.

Antes, para despachar diez contenedores, los operadores tenían que quedarse sobre jornada. Hoy, el mismo grupo despacha más de 20 contenedores al día y antes de que termine la jornada.

Junto con la productividad, la calidad también mejoró notoriamente. En 2021 despacharon 107.000 toneladas de carbonato de litio equivalente, o sea, 2,5 veces más que hace tres años, y lograron subir desde un 75% a un 99% de satisfacción del cliente.

Habían afinado todo el circuito para que el carbonato e hidróxido de litio se embarcara a Norteamérica, Europa y Asia en condiciones impecables de envasado.

Sin embargo, la crisis global de la cadena de suministros que desencadenó la pandemia del Covid-19 en 2020 trajo nuevos obstáculos para que los productos llegaran a puerto. Escaseaban los buques, los fletes, los pallets y los contenedores. En definitiva, faltaba todo lo necesario para llevar el producto al mercado. El peor problema era el de los contenedores. Antiguamente sobraban, había una sobreabundancia de contenedores, pero ahora simplemente no había y las empresas tenían que esperar meses a que se desocupara alguno para embarcar sus productos.

El equipo despacho-logístico-calidad tuvo que ingeniárselas por otras vías. Evaluaron arrendar buques grandes graneleros y llenar las bodegas de maxisacos con litio, tal como SQM llevaba décadas haciendo con los embarques de nitrato de potasio en el puerto de Tocopilla. Al principio esa idea pareció una herejía. El carbonato e hidróxido de litio era un producto químico mucho más delicado y solo se despachaba bien protegido dentro de un contenedor. Era uno de los aportes de la empresa. Pero, ¿qué otra opción había?

En julio de 2021 decidieron hacer una prueba con un embarque relativamente pequeño, de 400 toneladas de carbonato de litio en maxisacos, en un barco bodeguero para enviar a Estados Unidos. Se armó un equipo con el gerente de logística, el de calidad y los operadores para supervisar esta primera operación de chárter para productos de litio.

Estaban nerviosos, pero al menos tenían a su favor una trayectoria

histórica como empresa despachando volúmenes inmensos de fertilizante de especialidad en las bodegas de barcos tipo chárter en el terminal portuario de SQM en Tocopilla. Tenían que confiar en su capacidad de implementar algo similar para el litio.

El miedo era que se mancharan o rompieran los maxisacos durante el trayecto en la bodega. Decidieron envolverlos dentro de otra bolsa llamada *slim bag*, de material plástico resistente. Llevaron los sacos en camiones hasta el puerto y los dejaron ordenados en el patio, agrupados en lotes de 20 maxisacos, cada uno con su número de lote para tener trazabilidad.

Junto con la productividad, la calidad también mejoró. En 2021 despacharon 107.000 toneladas de carbonato de litio equivalente, 2,5 veces más que tres años antes, y subieron desde un 75% a un 99% en satisfacción de cliente.



Luego, una grúa tipo araña tomaba cada lote y los cargaba en la bodega del barco en un orden predeterminado, como un tetrís. Semanas después, el equipo multidisciplinario formado para esta crisis celebró cuando sus colegas de SQM en Estados Unidos les contaron que ese primer embarque granelero llegó de forma impecable a su destino. Dos meses después probaron enviar 800 toneladas a Europa con el mismo sistema, porque continuaba el problema de los contenedores y los clientes pedían y pedían litio. Ese segundo embarque a granel también llegó bien. Decidieron entonces arriesgarse con el primer embarque grande a China, de 4.000 toneladas. Era un barco completo, palabras mayores.

Para el primer chárter que enviaron a China cargado de litio, el equipo comercial de SQM en Beijing estaba ansioso y fue al puerto a esperarlo, rezando para que el valioso cargamento llegara en buenas condiciones. Respiraron aliviados al ver que la experiencia de los trabajadores portuarios chinos les permitió efectuar la descarga del producto de forma rápida y muy cuidadosa. El litio grado batería que llegó cumplió las expectativas de los clientes. Hoy con la situación naviera ya en plena normalidad, el equipo está preparado para otra contingencia.

Otro suministro que empezó a faltar en pandemia fueron los pallets. Se notó especialmente cuando la producción de las plantas de litio aumentó al doble. Ya no se necesitaban 60.000 pallets, sino que 120.000. Todos los días necesitan cuatro camionadas de pallets en la planta. Para cubrir parte de esta demanda, en El Carmen crearon una planta recuperadora de pallets rotos, con maestros que reparaban 2.000 de estas bases de madera al mes. También empezaron a comprar pallets plásticos a China. De los 20.000 pallets mensuales que hoy son necesarios, 2.000 son cubiertos con pallets resucitados en la planta recicladora.



Imprevistos en los puertos

En los últimos cinco años en los puertos del cono sur de América ha aumentado la frecuencia de las marejadas y otras inclemencias climáticas. Una realidad que llegó para quedarse por diversos motivos, como el cambio climático y corrientes marinas como El Niño. Marejadas o condiciones de vientos fuertes significan el cierre de los puertos o la prohibición de los trabajos de descarga durante varios días, por el vaivén de las naves ancladas. Los estándares de seguridad en los puertos y de los capitanes de las navieras impiden operar en condiciones de riesgo, porque se pueden dañar los contenedores, quedar mal estibada la carga o generar accidentes. Algunos puertos del norte, como el de Tocopilla, pueden estar cerrados hasta 100 días al año. Cuando eso ocurre, los barcos con insumos tienen que esperar días y a veces semanas en alta mar hasta que mejore el clima.

SQM, como empresa que embarca por mar la gran mayoría de sus productos de litio, también ha tenido que adaptarse a estas condiciones. La mayoría de los embarques de hidróxido y carbonato de litio se hacen desde Puerto Angamos. Pero debido a las eventualidades climáticas, la escasez de contenedores y el aumento de volumen de producción se han visto obligados a buscar otros puntos para embarcar el producto. Ya no basta con un solo puerto. Siguiendo una estrategia de diversificación se embarca litio desde el puerto de Antofagasta, Iquique, Tocopilla y hasta de puertos más lejanos, como Valparaíso y San Antonio.

Con un mar revuelto siempre hay urgencias e imprevistos que resolver. El 15 de enero de 2022 hubo un tsunami menor en las costas de Antofagasta y el barco que llegaba ese día con el cargamento de ceniza de soda no pudo ingresar porque el puerto estaba cerrado.

Esto era una emergencia para la planta, porque la ceniza de soda es el insumo principal para hacer carbonato de litio. Por cada tonelada de carbonato de litio que produce la planta, se utilizan dos toneladas de ceniza de soda. Es una materia prima prioritaria que llega todos los meses en embarques grandes, de 20.000, 30.000 o 35.000 toneladas.

Fueron pasando los días, el puerto continuaba cerrado y decenas de barcos se acumulaban en alta mar, también esperando descargar sus productos. En la planta de carbonato de El Carmen estaban con los nervios de punta ya que solo les quedaba ceniza de soda para cinco o seis días más. Si no recibían ese embarque a tiempo, tendrían que detener por completo las máquinas. Parar la planta, algo que no se hacía nunca, podía significar un atraso y un costo tremendo. A una planta química que produce entre 400 y 500 toneladas diarias de carbonato de litio le cuesta varios días volver a producir a toda capacidad.

El equipo de logística llamaba insistentemente al puerto, rogándoles que dejaran entrar al granelero con ceniza de soda. En la planta se estaban gastando hasta el último raspado del inventario de cenizas que quedaba en la bodega. En su desesperación, Germán Pérez estaba a punto de ir con una lancha y una pala a buscar las cenizas al barco. Finalmente, el puerto abrió. Por normativa chilena, la nave que llega primero al puerto es la que tiene el paso para entrar. Antes del carguero de SQM había varios en fila. El equipo logístico tuvo que hablar con todos los capitanes de barcos para pedirles que dejaran pasar primero al buque de ceniza de soda, solo por un día, lo suficiente para mantener activa la planta de El Carmen. Y luego se retiraría para dejar el espacio a los otros barcos. Los capitanes accedieron a la petición y el barco de ceniza de soda por fin pudo entrar al puerto y descargar la suficiente ceniza para que la planta de El Carmen recuperara el nivel mínimo que necesitaban para mantener viva la producción. Los camiones estaban esperando en fila en el patio del puerto y cada uno se llevó 27 toneladas del insumo salvador de regreso a la planta. Al final de la agitada jornada, el barco volvió a salir al mar y después de tres días llegó su turno para volver a entrar a puerto y entregar el resto de su carga.

Son situaciones adrenalínicas que seguramente seguirán ocurriendo porque la producción de litio va a seguir aumentando a más del doble y por la llegada de las naves que traen los insumos y se llevan los productos también se tendrá que ampliar por lo menos en un 50%.

Así todo, con escasez de suministros, con menos personal en los



SQM embarca por mar la gran mayoría de sus productos de litio y ha debido adaptarse a las eventualidades climáticas. La necesidad de diversificación ha llevado a la compañía a embarcar litio desde los puertos de Antofagasta, Iquique, Tocopilla y hasta Valparaíso y San Antonio.

turnos por restricciones del Covid-19 y con problemas logísticos, han sido años en que la producción de litio en SQM se triplicó. Mientras otros competidores atrasaron sus proyectos o bajaron su producción durante la pandemia, SQM hoy está inundando el mercado con litio. El mérito es del trabajo coordinado y la capacidad de encontrar soluciones innovadoras de los distintos equipos en las plantas y en el Salar.

El desafío de capturar un crecimiento atómico

En 2021 SQM vendió más de 100.000 toneladas de carbonato de litio, comparado con 2018, en que se vendieron 46.000 toneladas. Ese año vendieron a precios bajos porque pocos clientes estaban dispuestos a comprarles. Pero lograron resurgir en calidad y volver a ser competitivos. Los precios y el tamaño del negocio del litio han crecido lo suficiente como para que en el año 2022 se haya transformado en la principal línea de negocio de SQM, superando por lejos al área de nitratos yodo.

De hecho, en diciembre de 2021 SQM reorganizó la empresa en unidades de negocio y el litio, que antes estaba agrupado en la unidad litio yodo, ahora tiene su propia unidad de negocio. Ya tiene la suficiente importancia para pararse solo.

El litio tiene una gracia particular que lo distingue respecto a otros metales: su tasa de crecimiento. Cuesta encontrar otro metal en el mundo que crezca a las tasas aceleradas del litio. Incluso en 2020, cuando la demanda por todos los minerales bajó drásticamente por la pandemia, la del litio creció 50% entre un año y otro.

Los grandes desafíos estratégicos que enfrenta actualmente el negocio del litio de SQM son cuatro:

1. La flexibilidad para crecer.
2. La calidad y su anticipación a la calidad futura.
3. Los clientes, que ya no son solo los productores de cátodos, sino que también los fabricantes de baterías y de autos eléctricos.
4. La sustentabilidad medioambiental, hídrica y la responsabilidad hacia las comunidades.

El valor agregado del litio

El mayor valor agregado del litio que produce SQM es la investigación e innovación interna. El famoso penseque de la compañía. Es la tecnología creada y aplicada en el desierto chileno por los equipos que conforman SQM Salar para producir un carbonato e hidróxido de litio de altísima calidad, que cumple las exigencias que requiere la electromovilidad. “Cuando se dice que nuestro litio no tiene valor agregado, que nosotros poco menos que vamos con una picota y una pala a sacar el litio en carretilla y lo mandamos en un barco, eso es un mito. La concentración del litio en la salmuera del Salar de Atacama es de 0,2% y nosotros producimos químicos refinados de litio

que están en el 99,5% de pureza. Son productos terminados que están listos para ser usados en las baterías. El cliente no necesita transformarlo ni procesarlo más. Desde nuestro punto de vista, es un producto con valor agregado”, concluye Pablo Altimiras, vicepresidente ejecutivo de nitratos yodo.

Chile ha sido pionero en producir carbonato de litio e hidróxido de litio grado batería en un proceso integrado de punta a punta. Australia, un país mucho más desarrollado que Chile, superó a Chile en términos de la cantidad de materia prima de litio, pero no hacen un producto acabado como el que producen empresas como SQM y Albemarle en Chile. Australia tiene minas de litio en

roca y producen un concentrado de litio, que es un producto intermedio que solamente tiene un 6% de Li_2O . Ese producto en su totalidad se vende a China. China lo procesa y transforma en químicos de litio, como el carbonato y el hidróxido de litio. En cambio, en Chile está todo el proceso integrado, desde la extracción de la salmuera del Salar de Atacama, hasta la refinación química del carbonato e hidróxido de litio de altísima pureza en El Carmen, listo para ser usado directamente como material en los cátodos de batería. Es el único país que está integrado desde el recurso natural hasta el químico final y ha sido líder en la industria durante más de 20 años.

La mayor variedad y producción de autos eléctricos junto con la creciente preocupación por el cambio climático y la reducción de la huella de carbono han empujado la demanda de litio grado batería de SQM a niveles que crecen un 50% cada año. En el pasado la tasa de crecimiento anual se alzaba un 5, un 10 o un 15% en un muy buen año, pero nunca un 50%. Se proyecta que para 2025 la demanda va a llegar a un millón y medio de toneladas de carbonato de litio equivalente. Hoy nadie discute que el futuro es eléctrico y la mayoría de los países tiene metas para prohibir los autos con combustión interna en 2040 o 2050.

El gran desafío es cómo capturar ese crecimiento. Alcanzar la flexibilidad operacional para ejecutar proyectos que puedan seguirle el ritmo a la demanda tan disparada no es algo trivial y los equipos de SQM Salar afortunadamente lo vieron venir y han sido capaces de reaccionar con rapidez. La estrategia fue apostar por el crecimiento del mercado y tomar decisiones a tiempo para responder.





Mercado del litio

Mauricio Pereira⁽¹⁾, David Torres⁽²⁾ y Norman Toro⁽²⁾

⁽¹⁾ Gerencia de operaciones Salar de Atacama, SQM, Antofagasta, Chile.

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Arturo Prat, Iquique 1100000, Chile.

OFERTA Y DEMANDA EN EL MUNDO

El suministro de metales estratégicos como el litio es una prioridad para los países industrializados. El litio es un elemento que tiene diversos usos en el mercado, en donde es utilizado principalmente para la fabricación de baterías de ion litio. Esto se debe al incremento considerable en el consumo de tecnología de punta en el mundo, y la promoción del uso de tecnologías limpias, como vehículos eléctricos, paneles solares, etc. Debido a que el litio no puede sustituirse en la mayoría de sus aplicaciones, se espera un aumento constante en la demanda hacia el mediano y largo plazo. De hecho, este *commodity* está dentro del listado de materiales críticos estratégicos debido a su escasez de suministro e impacto significativo en la economía

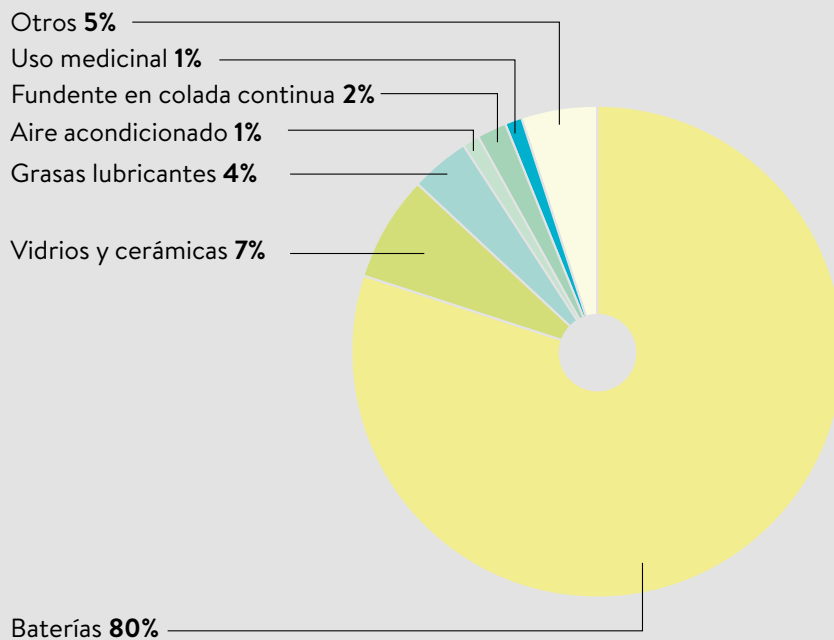
mundial proyectada hasta el año 2050. En este sentido, la creciente demanda de este metal requiere de un amplio conocimiento de los recursos y reservas disponibles, así como de su oferta y demanda futura. Por otra parte, el entendimiento de las tendencias del mercado es clave no solo para productores y compradores, sino también para el mundo científico, que muchas veces no cuenta con acceso detallado a estas publicaciones. Mientras tanto, si simplemente se refiere a los metales, se ha llegado a un consenso sobre cuáles son críticos, considerando los elementos de tierras raras, los metales de transición y los metales del grupo del platino. Entre las tecnologías limpias, los vehículos eléctricos presentan un aumento

considerable en su demanda en los últimos años. En el gráfico siguiente se puede observar el crecimiento en la venta global de vehículos eléctricos desde el año 2015 al 2021. Se puede apreciar que ha tenido un crecimiento constante, excepto el año 2019 donde la venta mundial se vio afectada por el Covid-19. Sin embargo, en 2021 se logró una venta anual de 6,6 millones de autos eléctricos en el mundo, triplicando los números obtenidos en 2019.

MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS				
Antimonio	Cobalto	Germanio	Grafito natural	Tierras raras ligeras
Berilio	Carbón coque	Indio	Niobio	Tierras raras pesadas
Boratos	Espato flúor	Magnesita	Grupo del platino	Metal de silicio
Cromo	Galio	Bismuto	Rocas de fosfato	Tungsteno
Litio	Titanio	Estroncio	Bauxita	Hafnio
Caucho natural	Vanadio	Wolframio	Tantalio	Escandio

Materias primas consideradas críticas por la Unión Europea en 2022.

2022

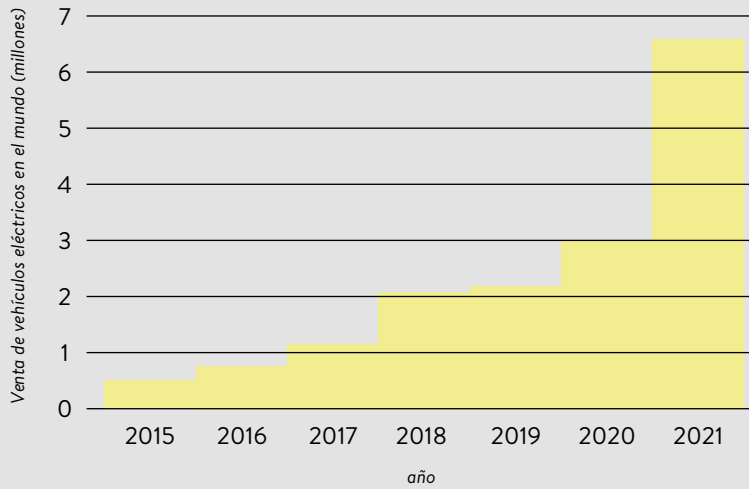


A nivel mundial, los vehículos eléctricos representan un 2,6% de las ventas de automóviles y aproximadamente el 1% del stock mundial de automóviles. El inventario mundial general de automóviles eléctricos alcanzó los diez millones en 2020, y los vehículos eléctricos a batería (BEV) representan dos tercios de la flota mundial de automóviles eléctricos. El mayor aumento en 2020 se produjo en

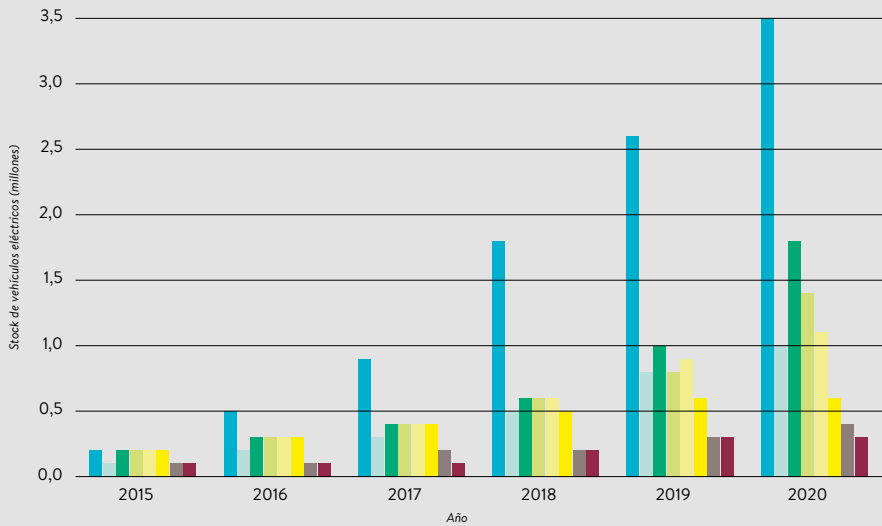
Europa, donde las cifras se duplicaron con creces hasta los 1,4 millones (una cuota de ventas del 10%), lo que lo convierte por primera vez en el mercado de autos eléctricos líder en el mundo. Le siguió China con 1,2 millones de registros (5,7% de participación en las ventas) y Estados Unidos se mantuvo tercero con 295.000 (2% de participación en las ventas). Este crecimiento ha sido impul-

sado por políticas de descarbonización del sector energético debido al interés mundial por implementar el Acuerdo de París, en conjunto con políticas de desarrollo sostenible planteadas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y el objetivo planteado por la Intergovernmental Panel on Climate Change de mantener a raya el aumento de la temperatura a nivel global.

Venta anual de vehículos eléctricos.



Stock mundial de vehículos eléctricos, 2010-2019.



- China BEV
- China PHEV
- Europe BEV
- Europe PHEV
- EEUU BEV
- EEUU PHEV
- Otros PHEV
- Otros PHEV

*BEV: Vehículo eléctrico a batería; PHEV: Vehículo eléctrico híbrido enchufable

LA EVOLUCIÓN DE LOS PRECIOS DEL LITIO

El consumo de litio en el mundo se divide principalmente entre carbonato e hidróxido (y en menor medida en otros, principalmente cloruro de litio). En la actualidad, el carbonato de litio es mucho más demandado, abarcando un 67% del mercado, frente a un 28% del hidróxido (año 2020). El precio al contado del carbonato de litio entre los años 2010 a 2015 variaba entre US\$ 5.000 y US\$ 6.500 la tonelada, aproximadamente. Posteriormente, el año 2016 los precios al contado del carbonato de litio promediaron un valor de US\$ 20.000 la tonelada. En 2017 los precios oscilaron entre US\$ 15.000 y US\$ 24.000 por tonelada debido al escaso suministro de espodumeno importado de Australia. Luego, en 2018 los precios disminuyeron desde los US\$ 21.000 por tonelada a principios de año hasta los US\$ 12.000 por tonelada en el tercer trimestre debido a que la producción mundial de litio excedió el consumo mundial de este metal.

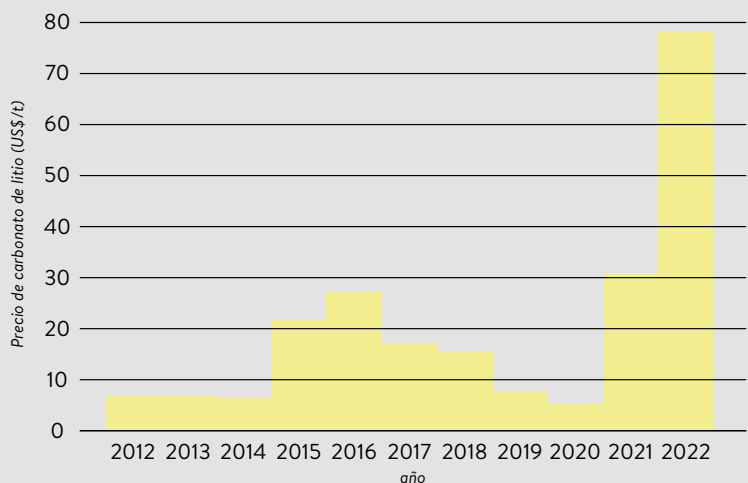
A partir de 2019, se presentó una baja en su valor, los precios disminuyeron desde US\$ 11.600 por tonelada a principios de año hasta US\$ 7.300 por tonelada en diciembre de aquel año, debido principalmente a tres factores:

- La apertura de seis nuevas minas para la extracción de litio en Australia, que generó un vigoroso aumento de la oferta en el mercado.
- China frenó la importación de litio debido a la guerra comercial con Estados Unidos, lo que puso un freno en su economía interna.
- La amenaza de reducción de China de sus subsidios a los autos eléctricos condujo a un menor crecimiento en las ventas y, consecuentemente, a una menor demanda de litio.

En 2020 los precios del carbonato de litio presentaron niveles récord bajos de US\$ 5.760 la tonelada, a causa del

freno en la actividad económica por el Covid-19. Sin embargo, el precio de este *commodity* comenzó a repuntar el año siguiente, y a partir de diciembre de 2021, el litio tuvo un crecimiento exponencial en su precio. Según datos de fuentes como Trading Economic e Investing, el 8 de diciembre de 2021 el precio de este *commodity* era de US\$ 29.490 la tonelada, el 11 de febrero de 2022 el litio superó los US\$ 60.000 la tonelada, y el 8 de marzo de 2022 su precio alcanzó los US\$ 80.000 la tonelada. Esto ha ocurrido como consecuencia de una elevada demanda mundial conforme avanza la producción de baterías para vehículos eléctricos sin que la oferta de litio sea suficiente, motivo por el que es llamado el “petróleo del futuro”.

Precio histórico del carbonato de litio.

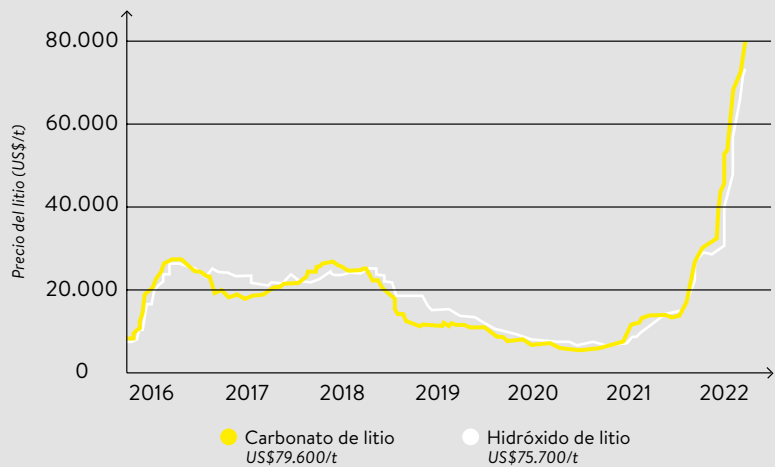


Respecto al hidróxido de litio se ha presentado la misma tendencia que el carbonato de litio. Según datos de las transacciones en Asia computadas por S&P Global Market Intelligence, desde diciembre de 2015 a diciembre de 2017 los precios promedio estimados del hidróxido pasaron de crecer un 97% a caer un 38% entre diciembre de 2017 y diciembre de 2019. Posteriormente, el hidróxido de litio presentó el mismo crecimiento exponencial en su valor que el carbonato de litio a partir de diciembre de 2021.

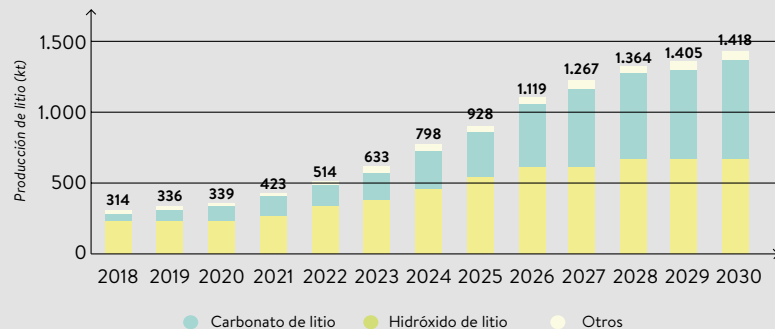
A pesar de que históricamente el carbonato de litio ha sido el compuesto químico más demandado para la fabricación de baterías de ion litio, se espera que a futuro sea el hidróxido el principal motor de la demanda de litio (57% del total versus un 42% para el carbonato hacia 2030). Lo anterior se explica por una inclinación creciente de los fabricantes por baterías del tipo NCM (Níquel-Litio, Cobalto, Manganeso), variedad en la cual se espera que el hidróxido sea crecientemente empleado en detrimento del carbonato.

La producción de ambos compuestos de litio continuará en aumento. Pero se debe destacar que la tendencia gradual de los fabricantes por el hidróxido hace relativamente más favorables las operaciones de mineral de roca en desmedro de los reservorios de salmueras. En parte por estos motivos, algunos de los fabricantes de litio a partir de salmueras como SQM en Chile están invirtiendo en una mayor capacidad de conversión desde carbonato a hidróxido de litio.

Comparación entre el precio histórico del carbonato de litio e hidróxido de litio.



Proyección en la producción de litio por compuesto químico.



RECURSOS DE LITIO EN EL MUNDO

Se estima que el contenido de litio en la naturaleza es de aproximadamente un 0,007%, sin embargo, por su alta reactividad, no es posible encontrarlo en estado puro o metálico en estado natural. Los recursos naturales de litio existen en minerales, arcillas, salmueras y agua de mar.

Los depósitos que son de interés económico para la producción comercial de litio se encuentran principalmente en salmueras y en varios minerales, distribuidos en diferentes partes del mundo. La salmuera que se produce en la corteza terrestre se denomina salmuera continental, y es la principal fuente para la producción de litio a nivel global. El litio

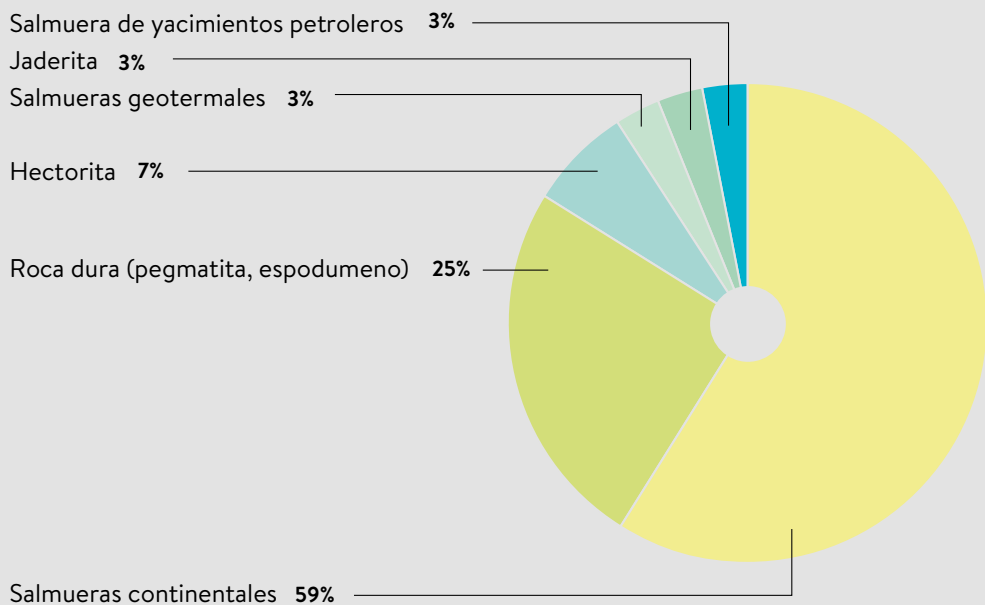
puede encontrarse además en cantidades significativas en aguas geotérmicas y en salmueras de pozos petroleros. En la literatura se reporta además la presencia de litio en el agua de mar, con contenidos cercanos a los 0,17 mg/L. Estas concentraciones no han hecho atractiva su explotación comercial.

Los principales minerales de litio en roca que tienen importancia comercial e industrial lo conforman la lepidolita, ambligonita, petalita, y, por mucho, el espodumeno. Este último es el mineral comercial más importante en la producción de litio desde roca dura. Los recursos geológicos –que pueden ser medidos,

indicados e inferidos– son concentraciones minerales que se identifican y estiman a través de exploraciones, reconocimientos y muestreos. Cuando estos recursos geológicos o hidrogeológicos presentan un interés económico sustentado por un plan minero y con una perspectiva razonable de una eventual extracción, se denominan recursos minerales.

Las reservas, por su parte, representan la fracción del recurso mineral medido e indicado que es económicamente extraíble de acuerdo con un escenario productivo, tecnológico y de sustentabilidad, inserto en un plan minero.

Distribución de litio desde diferentes recursos.



RECURSOS MINERALES DE LITIO

Debido a los importantes avances en la exploración de nuevos depósitos de litio, se ha aumentado de forma significativa los recursos en todo el mundo, sumando alrededor de 80 millones de toneladas en el año 2019 y 86 millones de toneladas en 2020, lo que representa un aumento del 7,5% en tan solo un año.

Los mayores recursos reportados se encuentran en el denominado triángulo del litio, en Sudamérica, donde los recursos en salmuera continental suman cerca de 47 millones de toneladas, lo que representa cerca del 60% de los recursos identificados.

Si bien en Bolivia se reportan los mayores depósitos de litio, con 21 millones de toneladas, la compleja composición química de la salmuera, baja concentración de litio, sumado a las condiciones climáticas menos favorables respecto a la realidad del Salar de Atacama han hecho compleja la producción de litio a gran escala.

RESERVAS DE LITIO

Chile, con 8,6 millones de toneladas de litio, reporta las mayores reservas de litio en el mundo a través de sus depósitos de litio en salmuera continental, donde destaca el Salar de Atacama, con las salmueras más concentradas en litio que se tengan registro.

En la actualidad, los depósitos minerales más importantes que contienen litio son las rocas ígneas, con 3,9 millones de toneladas. Estas pegmatitas contienen en particular los minerales espodumeno, lepidolita, petalita y zinwaldita. Australia, con 2,8 millones de toneladas, es el segundo país con mayores reservas de este metal. Por otra parte, en este país se encuentra Greenbushes, el mayor depósito de litio en roca dura. Este yacimiento corresponde a un depósito de espodumeno, con al menos 0,85 millones de toneladas de litio.

Otros depósitos de litio en roca de importancia se encuentran en Estados Unidos, China, Zimbabue, Rusia, y Canadá. Los principales depósitos en Europa se encuentran en Alemania, República Checa y Serbia. Con el vertiginoso avance de las exploraciones en Chile,

Australia y el resto del mundo, es posible que las reservas hayan experimentado un aumento significativo durante los últimos años. Por lo tanto, es importante tener en cuenta que estos datos deben considerarse únicamente como una referencia.

País	Reservas Li (t)
Chile	8.600.000
Australia	2.800.000
Argentina	1.700.000
Otros	1.100.000
China	1.000.000
Estados Unidos	630.000
Canadá	370.000
Zimbabue	230.000
Brasil	95.000
Portugal	60.000

Reservas de litio en el mundo por país

País	Recursos Li (t)
Bolivia	21.000.000
Argentina	17.000.000
Chile	9.000.000
Estados Unidos	6.800.000
Australia	6.300.000
China	4.500.000
Congo	3.000.000
Alemania	2.500.000
Canadá	1.700.000
México	1.700.000
Rep. Checa	1.300.000
Mali	1.000.000
Rusia	1.000.000
Serbia	1.000.000
Zimbabue	540.000
Brasil	400.000
España	300.000
Portugal	250.000
Perú	130.000
Kazajistán	50.000
Austria	50.000
Finlandia	50.000
Namibia	9.000

Recursos de litio en el mundo por país

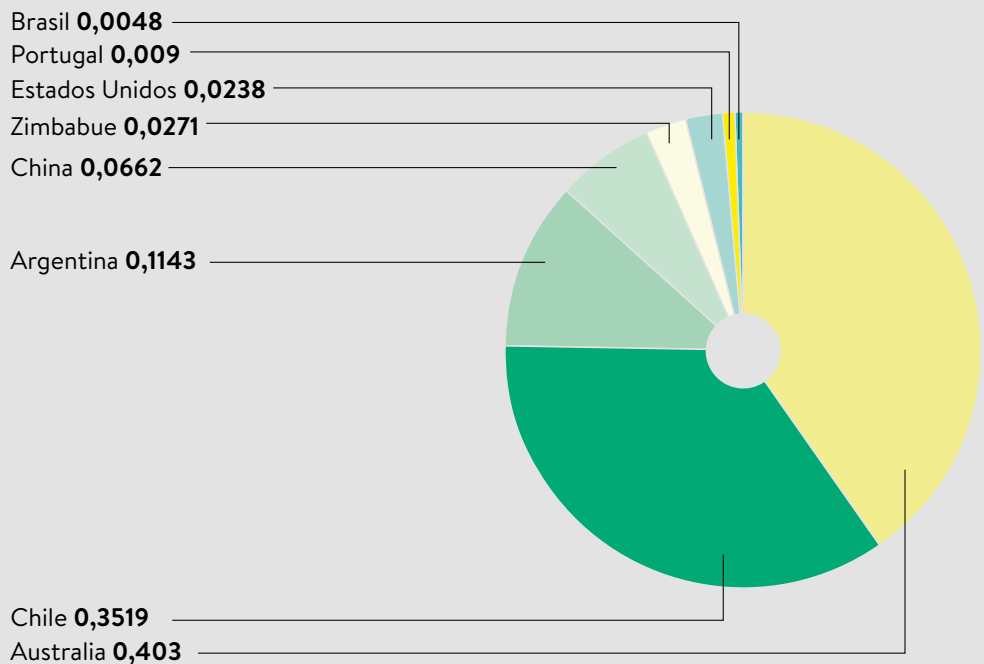
PRODUCCIÓN DE RECURSOS PRIMARIOS

En 2014 la producción mundial de litio alcanzó aproximadamente las 32.000 toneladas. Desde entonces solo ha ido en aumento, a distintas velocidades. En 2019 se reportó una producción de 73.000 toneladas, en 2020 aumentó a 83.000 para encumbrarse en 2022 a 167.000 toneladas y a un total esperado de 204.000 toneladas en 2023.

Con sus operaciones asociadas a espodumeno, Australia es el principal productor de litio en el mundo, representando un 40,3% del mercado. Seguido por Chile, que focaliza su producción en las operaciones del Salar de Atacama. Ambos países producen el 75,5% de la producción mundial.

Países como Australia, Zimbabue y Canadá han estado haciendo esfuerzos en la producción de litio a partir de roca, de hecho las dos nuevas operaciones de espodumeno en Australia representaron aproximadamente el 34% de la producción mundial de litio en el año 2017. No obstante, alrededor del 55% de la producción mundial de litio en 2018 todavía se producía a partir de salmueras.

Distribución de la producción de litio por país.



PRINCIPALES PROYECTOS EN EL MUNDO**Australia**

En Australia, se destaca la operación Greenbushes (Talisson Lithium), que es la mina de litio más grande del mundo, y cuya producción ha ido gradualmente en aumento en los últimos cinco años. Solo Greenbushes contribuyó con el 50% de las 267.000 toneladas de LCE extraídas en Australia en 2021. También se destacan las operaciones Pilgangoora (operado por Pilbara Minerals) y Pilgangoora Lithium (Altura Mining), ubicadas en el yacimiento de espodumeno de Pilgangoora en Western Australia. Ambos proyectos tuvieron un aumento en su producción de 2018 a 2019 donde de forma conjunta pasaron desde 8.000 a 35.000 toneladas, y se proyecta un aumento sobre 100.000 toneladas para 2025.

Según el Departamento de Industria, Ciencia y Recursos de Australia, dicho país produjo 333.000 toneladas de litio en forma de carbonato de litio equivalente (LCE) en 2022.

En cuanto a nuevos proyectos, se espera que comiencen a operar durante los próximos años nuevas operaciones, donde destacan:

- Finnis (propiedad de ASX)
- Wodgina (Albemarle y Mineral Resources). Este proyecto ya contaba con producción, pero fue suspendido a fines de octubre de 2019 a raíz de los precios a la baja.
- Mount Holland (SQM y Westfarmers), proyecto en etapa final de construcción. Se espera iniciar la producción de concentrado en Mt. Holland en el último trimestre de

2023, en tanto la planta química ubicada en Kwinana espera iniciar operaciones durante 2025.

Se espera que en 2025, estos tres proyectos aporten una producción de 75.000 toneladas de LCE.

Por otra parte, operaciones ya consolidadas como Mount Cattlin (operado por Galaxy Resources) y Mount Marion (Mineral Resources), deberían mantener sus niveles de producción actuales en 2025.

Chile

Se destacan dos grandes operaciones. Una es dirigida por SQM y la segunda, por Albemarle, y ambas están en el Salar de Atacama, que se caracteriza por tener las mayores reservas de litio contenido en salmueras continentales a nivel mundial. Para ambas operaciones, se espera que en 2025 se logre aumentar la producción desde 100.000 LCE en 2019 a más de 280.000 LCE.

También es posible que en los próximos años se comience a explotar litio en el Salar de Maricunga, opción que actualmente es estudiada por Codelco y Minera Salar Blanco.

China

Actualmente, China cuenta con operaciones productivas tanto de mineral de roca como salmueras, en donde se produjeron entre ambas aproximadamente 34.000 toneladas de LCE en 2019. Se destaca, para proyecciones futuras, la operación de Qarhan (Qinghai Salt-Lake – BYD), que produciría unas 25.000 toneladas de LCE para el año 2030. También existen diversos proyectos en diferentes etapas de desarrollo, de los cuales se espera que en conjunto aumenten de forma significativa el crecimiento en la oferta de litio. Sumando todo lo previamente expuesto, se espera que China produzca sobre las 100.000 toneladas de LCE para el año 2030, triplicando su producción actual.

Argentina

Argentina cuenta con operaciones en el Salar Hombre Muerto (operada por Livent) y en el Salar de Olaroz (Orocobre), las que producen litio a partir de salmueras. A causa del Covid-19, se ha visto una baja en la producción de ambas operaciones. Sin embargo, se espera un aumento en los próximos años por la habilitación de nuevos proyectos, donde se destacan Caucharí/Olaroz (Lithium Americas), Centenario Ratones (Eramet) y Sal de Vida (Galaxie Resources), que en su conjunto aportarán 50.000 toneladas de LCE entre los años 2025 y 2030.





La concesión minera de SQM para extraer principalmente litio y potasio en el núcleo del Salar de Atacama tiene una extensión de 820 kilómetros cuadrados, aproximadamente 100 kilómetros de largo por 80 de ancho. Es un depósito de salmueras que se formó en un tiempo de dimensiones geológicas, de millones de años, como producto de un proceso larguísimo de evaporación. Toda la esponja salina que conforma el Salar de Atacama es el resultado de agua de lluvia y nieve que escurrió desde la cordillera que se fue evaporando en el tiempo y que depositó sales en esta cuenca endorreica, cerrada, donde la única salida posible del ciclo del agua es la evaporación. Esas aguas fueron conformando una esponja porosa sólida salina. Y el líquido que no se evaporó es la salmuera, un fluido muy concentrado en sales que se mueve en los intersticios y poros de esa esponja. La salmuera acumulada en ese núcleo está cautiva, porque el Salar es un sistema cerrado que sigue recibiendo cierta recarga desde la cordillera a través de la zona de transición. Es, sustancialmente, una mina o depósito mineral líquido. Lo que SQM considera como mina es el gran reservorio de salmueras ricas en cloruro de litio, de potasio y otras sales, que se formó en millones de años.

Como yacimiento de litio y cloruro de potasio, el Salar de Atacama tiene la mejor concentración que se conozca en el mundo en un salar, con una concentración natural de litio en la salmuera de 0,2% en promedio. Es un lugar privilegiado en cuanto a la calidad y cantidad de sus recursos naturales y también por su ubicación geográfica, porque está a una altura de 2.300 metros sobre el nivel del mar, en el Trópico de Capricornio, donde hay una muy fuerte insolación que favorece el uso de la radiación solar como principal energía para evaporar las salmueras en pozas. El proceso de evaporación solar que se usa en el Salar de Atacama es un sistema extremadamente eficiente, que permite obtener los productos básicos como el litio y el potasio usando una fuente de energía sustentable y de costo cero.

Para optimizar continuamente este proceso, el equipo de hidrogeólogos del Salar a cargo de Corrado Tore trabaja en el estudio del yacimiento, para entender dónde están las mejores salmueras para producir litio. Estudian el yacimiento y también lo cuantifican. Ellos son quienes dan los nú-

meros a la Security Exchange Commission de Nueva York, una suerte de superintendencia en Estados Unidos que obliga a las compañías que transan en la bolsa de Nueva York a declarar todos los números de la empresa, incluyendo cuántas reservas de litio hay en las salmueras del Salar de Atacama.

También trabajan en la receta química, es decir, identifican las salmueras que conviene extraer y mezclar para traspasar a las pozas de evaporación solar y obtener al final del proceso una solución de cloruro de litio en la concentración y pureza adecuadas para la planta de El Carmen. Las salmueras del Salar de Atacama tienen la ventaja única de ser extraordinariamente ricas en litio, pero también tienen una heterogeneidad que hace más compleja la explotación. Actualmente hay 450 pozos productivos, todos con químicas distintas entre sí, los que no necesariamente operan simultáneamente. El resultado final depende en gran parte de mantener una buena oferta de pozos productivos para hacer un mix adecuado de salmueras para las distintas líneas de pozas de evaporación.

Por último, buscan seguir perfeccionando la conformación de las piscinas, porque el resultado del producto depende de los tiempos de evaporación, que duran alrededor de 13 meses. Para acelerar lo más posible el proceso, el sistema está optimizado con un diseño de pozas extensas en superficie y de poca profundidad. Actualmente hay 50 millones de metros cúbicos de salmuera en 50 kilómetros cuadrados de pozas, para que el circuito completo dure aproximadamente un año.

Hidrogeología tiene un trabajo de corto plazo con el área de recursos y operaciones de SQM Salar, que consiste en entregarles los pozos productivos con la calidad proyectada a doce meses para producir durante ese año. Esa información se actualiza continuamente porque los operadores de pozas tienen que seguir traspasando salmuera en las pozas de evaporación todos los días y necesitan conocer los recursos que tienen a su disposición en el presente y en los próximos meses.

Hidrogeología también realiza –y ajusta– continuamente proyecciones a cinco, diez o 15 años en el futuro y les entrega información precisa a los investigadores de innovación y procesos, como Osvaldo Yáñez.



El área de hidrogeología entrega proyecciones a cinco, diez y 15 años a los investigadores de innovación y procesos del Salar, que necesitan saber cómo va a evolucionar la composición química de la salmuera. Si los cambios son grandes, las pozas de evaporación solar y la planta de El Carmen tendrán que modificar su tecnología y adaptarse a la mayor o menor presencia de magnesio o sulfato.



Los especialistas quieren saber cómo va a evolucionar la composición química de la salmuera en cinco años, porque si cambia mucho, las pozas de evaporación solar y la planta de El Carmen tendrán que cambiar su tecnología, adaptarse a si hay más o menos magnesio o sulfato. La concentración de litio sigue siendo buena en las simulaciones futuras, pero su evolución está avanzando hacia una química dominante distinta a la que predomina hoy. La tendencia futura es que irá acompañado de otros elementos, como sulfato, que condicionan la forma en que hay que tratar esa salmuera para extraer el litio. El proceso tradicional probablemente no va a servir en cinco años más y es en ese horizonte de tiempo que Osvaldo Yáñez tiene que pensar cómo el área de recursos y operaciones va a prepararse para producir en las pozas para entonces.

La gerencia de hidrogeología está encargada de controlar la red de monitoreo ambiental, que consiste en 225 puntos de control para medir los niveles hidrogeológicos de los ecosistemas que componen el Salar de Atacama y su evolución en el tiempo. Reporta a la Superintendencia de Medioambiente cada seis meses.

El monitoreo hidrogeológico y medioambiental de la cuenca del Salar

El segundo interlocutor importante del área de hidrogeología de SQM Salar es la red de control medioambiental. La gerencia de hidrogeología está encargada de controlar la red de monitoreo ambiental en el Salar, que son 225 puntos de monitoreo, que incluyen pozos, estaciones meteorológicas, estaciones de aforo, superficies lacustres, entre otros. No son para explotación sino para medir los niveles hidrogeológicos de los ecosistemas que componen el Salar de Atacama, su evolución en el tiempo y reportar esa información a la Superintendencia de Medioambiente cada seis meses. Desde agosto de 2020 los resultados de cada uno de los 225 puntos de monitoreo medioambiental, junto a otra información relevante para el seguimiento ambiental hidrogeológico, están en línea en una página web abierta al público.

La flora y fauna también son monitoreadas mediante estudios de campo, imágenes satelitales, censos de vida silvestre y estudios limnológicos. Los hidrogeólogos dedicados al monitoreo medioambiental utilizan las mismas herramientas de simulaciones futuras que utiliza el área produc-

tiva, pero enfocada al cuidado de los sistemas sensibles como las lagunas y las poblaciones de flamencos en la zona marginal del Salar.

El área de hidrogeología también implementó un sistema de alerta temprana para prevenir impactos ambientales graves por el bombeo de agua y salmuera. En el caso que se observen desviaciones respecto del comportamiento esperado, los operadores de pozos deben reducir inmediatamente el volumen de bombeo de agua o salmuera, con el objetivo de evitar el riesgo potencial de afectación en los ecosistemas sensibles de la cuenca. Desde agosto de 2020 en www.sqmsenlinea.com es posible revisar los resultados de los indicadores de cada uno de los 225 puntos de control.

Existe una gran sensibilidad y escrutinio de parte de las autoridades medioambientales, las comunidades del Salar y también de los clientes del mercado de baterías respecto a las operaciones de SQM en el Salar de Atacama y la medición de su impacto para el medioambiente. La publicación de la página web ha sido una contribución a la transparencia y también al conocimiento hidrológico y medioambiental del Salar de Atacama. La información publicada en línea es usada por la DGA para hacer sus estudios y la misma Corfo hizo un estudio autónomo sobre el Salar de Atacama, publicado recientemente, usando gran parte de la información publicada por SQM para construir su modelo del Salar de Atacama.



El área de hidrogeología implementó un sistema de alerta temprana para prevenir impactos ambientales graves. Si se observaran desviaciones respecto del comportamiento esperado, los operadores de pozos deben reducir inmediatamente el volumen de bombeo de agua o salmuera, para evitar el posible riesgo de afectar los ecosistemas de la cuenca.

El ciclo y cuidado hidrológico del Salar de Atacama

En la zona geográfica donde está ubicado el Salar de Atacama existe una situación particular con las lluvias que explica muy bien el ciclo hidrológico de la zona. Hacia el este del Salar, en los valles centrales desérticos las precipitaciones rara vez superan los dos milímetros anuales, mientras que arriba del Salar, en la cordillera de los Andes, se promedia en 120 milímetros cada año. La diversidad climática de la región es muy relevante para entender cómo opera el ciclo hidrológico. En ella se identifican cuatro tipos de climas: el clima desértico nuboso, en la costa; el clima desértico, en el desierto de Atacama; el clima marginal desértico, en el Salar de Atacama, y el clima de alta estepa, en la cordillera de los Andes. SQM Salar opera en este contexto, acoplado al ciclo hidrológico y monitoreando constantemente el agua de la cuenca.

Una parte del agua disponible en la cuenca escurre superficialmente desde la alta cordillera a través de pequeños cauces y quebradas. La mayor parte, sin embargo, escurre de manera subterránea, alimentando los acuíferos de la cuenca hasta la zona marginal o de transición en los bordes del Salar, donde se manifiestan naturalmente en superficie. Es en esta zona donde están las lagunas Cejar, Tebenquinche y otros ecosistemas de gran valor medioambiental y turístico.

En la cuenca del Salar de Atacama existen dos tipos de fluidos: la salmuera y el agua dulce. La salmuera es un líquido extremadamente denso y de altísima salinidad: es casi siete veces más salada que el agua de mar. Esta salmuera se encuentra exclusivamente en los reservorios localizados bajo la superficie del núcleo del Salar, lugar donde están situadas las operaciones de extracción de SQM Salar, mientras que el agua dulce se observa en los acuíferos de la planicie aluvial, a los pies de la cordillera. Cuando ambos fluidos entran en contacto, su enorme diferencia de densidad hace que el agua dulce fluya por encima de la salmuera, formando una interfaz o cuña salina entre ambos. Se trata de una zona de equilibrio de estos dos fluidos, que se mantienen naturalmente separados.





La escasa permeabilidad de los materiales en esa zona se opone mucho al movimiento, lo que también contribuye a que la cuña salina se mantenga estable y sin mezclarse. Un foco importante del monitoreo medioambiental que hace SQM es vigilar que esa zona de equilibrio o cuña salina se mantenga en esa posición. Como el agua dulce se mueve por encima de la salmuera, al llegar a las cercanías del núcleo del Salar no tiene otro camino que salir a la superficie, formando pequeños lagos y canales que se observan en la zona marginal.

Este proceso dinámico del ciclo del agua y de las salmueras es el que permite la existencia de la vegetación que se observa en los alrededores del Salar. El agua dulce está disponible de forma superficial y subterránea y es un elemento fundamental para el desarrollo de las diversas actividades de la cuenca, incluyendo el abastecimiento de la agricultura y procesos industriales. Cabe señalar que la salmuera por su alta salinidad no es adecuada para estos propósitos y no se puede extraer de ella agua dulce de manera económica.

SQM realiza captación de agua y de salmueras después de que las comunidades se han abastecido para su uso residencial y comercial. El agua que capta SQM se encuentra en acuíferos subterráneos, ubicados a decenas e incluso cientos de metros debajo de las quebradas y cauces naturales de aguas superficiales que utilizan las comunidades y pueblos originarios que habitan la cuenca del Salar de Atacama.

Para sus operaciones, SQM usa solo una pequeña porción del agua dulce disponible en el Salar. Actualmente bombea desde cuatro pozos ubicados en el margen este un máximo de 180 litros de agua fresca por segundo, y la tasa promedio del último año es de 107 L/seg. Esta cifra es menos de la mitad de los 240 litros por segundo que fueron autorizados por la autoridad ambiental. Con esta cantidad de agua la empresa produce cerca de dos millones de toneladas de sales de potasio y 270.000 toneladas de solución de cloruro de litio en su concesión en el Salar de Atacama.

En este contexto, los derechos de agua subterránea de la cuenca asociados al turismo y abastecimiento alcanzan aproximadamente los 210 litros por segundo, mientras que los derechos de aguas superficiales de la

cuenca asociados fundamentalmente al riego y abrevado de ganado por parte de las comunidades alcanzan los 2.400 litros por segundo. Los derechos de agua subterránea actualmente en explotación asociados al ámbito de la gran minería del cobre son del orden de 200 litros por segundo.

La empresa, como parte de su compromiso con la sustentabilidad del Salar de Atacama, tiene planes para continuar reduciendo gradualmente el consumo interno de agua y la emisión de carbono de sus operaciones.

SQM usa solo una pequeña porción del agua dulce disponible en el salar. Actualmente bombea desde cuatro pozos ubicados en el margen un máximo de 107 litros de agua fresca por segundo. Esta cifra es menos de la mitad de los 240 litros por segundo autorizados por la autoridad ambiental.

¡A extraer litio!

A partir de 2017 los directivos de la empresa instruyeron un cambio de estrategia cardinal para el Salar de Atacama. El foco principal dejó de ser extraer salmueras ricas en cloruro de potasio, como venían haciendo hacía 20 años, y pasó a ser concentrarse en las partes del yacimiento más ricas en litio. Todo pozo de litio era prioridad máxima. Se seguiría produciendo potasio, pero solo como un subproducto de la extracción de litio, que de un momento a otro pasó a ser el recurso protagónico de las operaciones del Salar.

Fue un cambio de mentalidad de dimensiones tectónicas para el área hidrogeológica. Hasta entonces gran parte de los hidrogeólogos estaban dedicados a mantener funcionando los pozos productivos que ya estaban disponibles y el 90% eran para potasio. Los pozos que tenían una química de alto litio eran muy pocos, unos seis o siete. Los hidrogeólogos, que hacía tiempo ya veían venir un boom del litio por el auge del mercado de las baterías, intentaban cuidar esos pozos al máximo porque era la única fuente abundante en litio que tenían en el Salar. Los pozos productivos de litio eran los que más mantenían y monitoreaban, a pesar de que no era el objetivo que tenía la empresa en ese momento, porque intuían que pronto serían prioritarios. Hasta que llegó el día.

Siete pozos era demasiado poco. Como urgía aumentar rápidamente la oferta disponible de pozos productivos de litio, ampliaron el área de exploración y de explotación para encontrar salmueras que pudieran ser de mejor utilidad para la producción de litio.

Empezaron a practicar la exproducción, que es exploración y producción al mismo tiempo. Los hidrogeólogos estudiaban los nuevos pozos a medida que se iban poniendo en marcha para producir salmueras. Eso permitió tener información para ser más predictivos del comportamiento de los pozos.

Los pozos productivos que estaban acostumbrados a construir en el área de operación de mina eran preferentemente de potasio y no de litio, por eso necesitaban que los hidrogeólogos les entregaran la mayor

A partir de 2017 el equipo de hidrogeología creció a más del doble, reforzado con hidrogeólogos, geólogos, geofísicos, modeladores matemáticos e hidrólogos. Este crecimiento rindió frutos y hoy SQM tiene 450 pozos productivos. El 60% de ellos tienen químicas ricas en litio y entre un 30 y 40% son pozos de potasio.

cantidad de antecedentes para que fueran mejorando la construcción de pozos con leyes altas en litio. Inicialmente las reuniones eran semanales y las preguntas llovían sobre los hidrogeólogos en terreno: ¿Cómo va el pozo? ¿porqué está fallando? ¿a qué se debe? Era casi en simultáneo la obtención de la información fresca y procesada desde los pozos con el imput que se le entregaba a los constructores de los nuevos pozos productivos para seguir mejorando.

El viraje hacia el litio significó que la misión de los hidrogeólogos era darle al área de operaciones la mejor combinación de pozos para producir litio. Es decir, la mejor concentración inicial, la mejor relación iónica y caudal que optimice la producción de litio en las pozas de evaporación.

Todos los recursos del área de hidrogeología -las máquinas, los profesionales, los estudios y mediciones en terreno- se enfocaron en seguir explorando y perforando para buscar salmueras de la mejor calidad posible para que los planes de producción se puedan mantener en el tiempo.

Fue el comienzo de una nueva y gran oleada exploratoria de la hidrogeología del salar. Hasta 2016 en el área de hidrogeología de SQM Salar, a cargo del hidrogeólogo Corrado Tore, trabajaban siete u ocho profesionales en terreno más diez hidrogeólogos en Santiago. A partir de 2017 el equipo creció a más del doble, reforzado con hidrogeólogos, geólogos, geofísicos, modeladores matemáticos e hidrólogos.

Ese trabajo rindió frutos en pocos años. Actualmente alrededor del 60% de los pozos productivos son de químicas ricas en litio y entre un 30 y 40% de ellos siguen siendo pozos de potasio. La oferta se dio vuelta.

La exploración del yacimiento se enfocó en estudiar en qué porción del Salar están las salmueras más ricas en litio y cómo evolucionan en el tiempo, mediante modelos de simulación hidrogeológica y modelación geológica. Hasta entonces la exploración se había concentrado en los primeros 80 metros de profundidad, que es donde están las salmueras más ricas en cloruro de potasio. Pero ahora el nuevo interés de la compañía estaba en explorar las zonas más profundas en el Salar. En esas honduras, poco estudiadas, se siguen encontrando reservas de litio.

Desde 2018 la compañía comenzó a explorar aquello que los hidrogeólogos llaman la AUC, la unidad hidrogeológica más profunda, bajo los 100 metros de profundidad. En esas honduras poco exploradas es donde se encuentran las mayores reservas de litio.

Los estudios geológicos de las capas subterráneas

El nuevo foco en el litio llevó a hacer exploraciones y nuevos pozos productivos en capas más profundas de las que estaban habituados. Conocer mejor la geología del subsuelo era muy importante para encontrar salmueras ricas en litio. El Salar de Atacama está compuesto por distintas capas geológicas, como una torta. Cada una de esas capas que están a distintas profundidades, contiene salmueras con diferentes químicas. Algunas son más sulfatadas, otras son más cálcicas. Las más sulfatadas son evitadas en lo posible, porque hacen más compleja la recuperación del litio en las pozas de evaporación solar. En cambio, el calcio favorece la precipitación del litio, entonces se busca encontrar salmueras más cálcicas.

Las grandes estratigrafías que existen en el Salar son, de arriba hacia abajo, la halita, el yeso, la arcilla y rocas volcanoclásticas. Un trabajo estratigráfico y estructural de detalle que comenzó a elaborar el equipo de hidrogeología a partir de 2018, robusteciendo así un modelo conceptual e hidrogeológico. Antes, se sabía que había ciertos niveles de estratos ricos en litio, pero no estaban identificados ni menos modelados dentro del yacimiento. Actualmente, en las exploraciones se pesquisan las capas geológicas más deseadas y el modelo geológico ayuda a identificar dónde están.

En este sentido, una de las innovaciones más relevantes en los últimos cuatro años ha sido la inclusión, a partir de 2018, de herramientas geofísicas que han ayudado considerablemente a afinar el modelo geológico de las capas que conforman el subsuelo del Salar. Ayudan a identificar a qué nivel de profundidad están las capas a la hora de construir un pozo. Pero también entrega otros conocimientos valiosos, como la dimensión de las fallas. Antes de eso, los geólogos de SQM sabían que había fallas o fracturas de la corteza terrestre en ciertas áreas. Pero no tenían cómo medir su dimensión o profundidad. Hoy conocen bien las principales fallas que existen en la zona de la operación y eso es gracias a la unidad de geofísica.

La geofísica es una ciencia que emplea mediciones físicas y modelos matemáticos para explorar la estructura y condiciones físicas de la Tierra.

Uno de los proyectos que implementaron los geofísicos fue un equipo de sísmica de reflexión, que hace vibrar el suelo con golpes. Al mismo tiempo se instalan unos geófonos que convierten el movimiento del suelo en una señal eléctrica. Las vibraciones bajan hacia el subsuelo y van rebotando con los objetos que encuentran, como un radar. Toda esa información se va procesando con un *software* que entrega imágenes de las distintas estratigrafías del subsuelo. Cuando hay fallas, ese fenómeno se refleja como un salto en la imagen. Por ejemplo, la falla principal del Salar de Atacama, que se llama Falla Salar y que pasa bordeando el depósito uno de salmueras, se visualiza en la pantalla como un salto o caída de aproximadamente 350 metros. Esta información que muestra la sísmica de reflexión después se corrobora y se completa perforando pozos de estudio.

La cordillera y, en general, Chile, es uno de los puntos más sísmicos del planeta, en donde converge la placa oceánica con la placa continental. Al chocar ambas, tienen tanta fuerza que comienzan a subir y a acumular presión. El terremoto ocurre cuando esa presión se libera a través de un movimiento de la tierra. Esas caídas que se reflejan en las imágenes de la sísmica de reflexión se deben a fallas y a terremotos que desplazan los bloques subterráneos que conforman el Salar.

Otra tecnología que se está incorporando es la datación de radiocarbonos. Se extraen muestras de ciertos pozos en distintas áreas, se les hacen unos cortes y se envían esos cortes a Australia, donde les hacen una datación con radiocarbonos para identificar la edad de la roca. Esa información también ayuda a dar más veracidad al modelo geológico.

Toda esta investigación ayuda a los geólogos e hidrogeólogos a identificar dónde se ubica el nivel o capa geológica que quieren extraer.

Los geólogos exploran el Salar continuamente perforando pozos de estudio. De cada uno de estos pozos se extraen testigos de diamantina, cilindros de material sólido que se obtienen del interior del pozo para determinar metro a metro la composición litológica en sus distintas profundidades. Con esa información se arma un estrato del pozo y se carga en un programa llamado Imago, una biblioteca fotográfica geológica digital que

Las muestras físicas se guardan en un espacio del patio de hidrogeología, que es un archivo kilométrico al aire libre, con cientos de hileras de racks de acero. En ellos está guardada la información geológica histórica de los 7.000 pozos de estudios perforados por SQM desde 1993.



se implementó en 2019. Todos los sondajes realizados con diamantina se analizan y fotografían, para tener la información respaldada en el sistema.

Las muestras físicas se guardan en un espacio del patio de operaciones de hidrogeología que los geólogos llaman “zona de racks”, que en realidad es un archivo kilométrico de muestras al aire libre, con cientos de hileras de racks de acero con bandejas metálicas. Ahí, a pleno sol, está guardada la información geológica histórica de cada uno de los 7.000 pozos de estudios perforados en el Salar por SQM desde 1993, codificada por número y letra. Antiguamente las muestras de sondajes ni siquiera estaban en bandejas metálicas, se guardaban en bandejas de madera. Como en el salar hay épocas de lluvias copiosas, las bandejas se dañaron y se perdieron algunos sondajes. En ese momento decidieron cambiar todas las muestras a bandejas de metal, ordenadas en racks. En esas bandejas de acero inoxidable está la muestra tangible del conocimiento estratigráfico que se ha estudiado en el Salar. Con ellas se puede verificar toda la información sobre las reservas y geología del Salar de Atacama.

Es uno de los activos más valiosos de SQM, porque con esa información se va completando y perfeccionando el modelo geológico.

Los geólogos exploran el Salar continuamente perforando pozos de estudio. De cada uno se extraen testigos de diamantina para determinar metro a metro la composición litológica en sus distintas profundidades. Con esa información se arma un estrato del pozo y se carga en un programa llamado Imago, una biblioteca fotográfica geológica digital que se implementó en 2019.

El modelamiento hidrogeológico

Una parte clave del equipo de hidrogeología es la que está encargada de generar el modelamiento hidrogeológico desde las oficinas de SQM en Santiago. El modelamiento es la herramienta que usan los hidrogeólogos para entender cómo funciona el Salar desde el punto de vista conceptual. Actualmente alrededor de 35 profesionales componen ese equipo. Trabajan con *softwares* que son estándar en la industria del modelamiento numérico del agua subterránea y que les permiten validarse con otros pares y hacer comparables los distintos procesos. Pero también han desarrollado herramientas propias de *data science* y *machine learning* para resolver problemas específicos en el Salar de Atacama. Usando la inteligencia artificial tratan de hacer proyecciones a partir de los datos que tienen hoy.

Siempre va a existir un cierto grado de interpretación e incertidumbre en el modelamiento hidrogeológico, porque lo que está en el subsuelo del Salar es algo que nunca se va a conocer enteramente. Pero con los pozos e información existentes se pueden generar distintas interpretaciones y modelos numéricos de cómo es el subsuelo y proyectar comportamientos futuros.

A partir de una primera línea de datos obtenidos en terreno, un grupo de modelación conceptual trata de entender y mapear las distintas capas geológicas subterráneas. Van alimentando su modelo con la información geofísica, de los pozos y de imágenes satelitales.

En las visualizaciones del modelo se ven unas rayitas que son las perforaciones, los pozos de exploración que hace el equipo de Helio Hernández, superintendente de exploración. Ellos son el brazo armado que tiene hidrogeología, que perfora para poder mejorar el conocimiento del Salar. Con esa información de los pozos se pueden modelar reconstrucciones geológicas de subsuperficie.

Con un *software* se construye un modelo 3D que muestra las distintas capas de rocas, sus características y si hay presencia de fallas. Sobre esta base geológica se trabaja el modelo hidrogeológico.



SQM tiene una valiosa biblioteca fotográfica digital de todos los testigos o muestras de roca que ha extraído en los sondajes de exploración en el Salar de Atacama, que entregan información directa desde la salmuera. Estas imágenes corresponden a estratigrafías del sondaje DD22-03 realizado durante la campaña de exploración 2022.



DD2206
F-8400

DD2160
F-8550

DD2203
F-84100

DD2203
F-8800

DD2172
F-8850

DD2203
F-9150

DD2203
F-9000

(89)

(86) 100

(89)

(91)

16

90146

8800

Luego vienen los equipos de modelación numérica, que traducen la información del terreno a un modelo computacional y matemático.

Una de esas líneas de modelación está basada en la física y sigue variables físico matemáticas como la velocidad del agua. Aplican modelos para proyectar cómo se mueve el flujo subterráneo de los fluidos en zonas saturadas de medios porosos como el Salar de Atacama, en el presente y el futuro.

Sobre ese modelo viene otra capa de información que indica los movimientos de flujos y con números y letras las características químicas. Por dónde llueve, en qué zonas percola hacia el subsuelo, en qué zonas sale otra vez esta agua a la superficie. Las características químicas de estas aguas también indican el flujo y en qué dirección van.

Otra capa de información es el contenido de litio que existe en los distintos pozos y sus posibles cambios proyectados en el tiempo. Para alimentar los modelos numéricos integran la información que recolectan en terreno los geólogos e hidrogeólogos en el Salar. Cuando quieren predicciones de largo plazo sobre el comportamiento de un pozo productor en los siguientes dos o tres años, los hidrogeólogos hacen pruebas de bombeo. Así consiguen antecedentes hidráulicos como el coeficiente de almacenamiento, la conductividad hidráulica y las químicas.

Una parte importante de las proyecciones que modelan son para la parte operativa. Dentro del grupo, hay especialistas en hidrogeología y en simulación numérica que anticipan cómo va a funcionar cada pozo la próxima semana, el próximo mes, en dos meses, en uno y en dos años.

Semanalmente, el gerente de operaciones de SQM Salar Gilbert Maldonado recibe la actualización de la oferta de cada uno de los pozos productivos. Es decir, cuál va a ser el comportamiento de caudal, la cantidad de salmuera que se va a extraer y las químicas que van a tener en horizontes de tiempo de una semana, seis meses y dos años. Esta información es crucial para que esta área pueda planificar los flujos y traspasos de salmuera en los pozos y pozas de evaporación.

Otras proyecciones están enfocadas en evaluar el potencial impacto

de las operaciones en el medioambiente y garantizar que no afecte a las lagunas, las poblaciones de flamencos y otras especies ni a las distintas comunidades del entorno del Salar de Atacama. Las herramientas numéricas permiten simular distintos escenarios: ¿Qué pasa si llueve mucho? ¿qué pasa si no llueve? ¿qué pasa si la extracción de salmuera de SQM aumenta al doble? Observando distintos factores como el gradiente de las aguas que caen en las altas montañas y después alimentan las lagunas, los modeladores traspasan esa información a un modelo numérico en el que pueden simular la lluvia, cómo el agua se infiltra, cómo corre por las montañas y termina llegando hasta las lagunas de los bordes del Salar.

La investigación en modelación numérica que desarrolla esta área tiene un gran valor. Actualmente SQM está empezando un proceso de evaluación ambiental para un nuevo proyecto presentado a las autoridades y la empresa hizo público el análisis conceptual y numérico y las herramientas desarrolladas para la modelación del impacto ambiental del proyecto en la página web del SIA (Sistema de Impacto Ambiental). Es un proceso que va a durar dos años y que va a ser revisado por las distintas agencias, como la DGA, el Sernageomin, Conaf y el SAG. Los datos, los análisis y las herramientas de modelamiento son públicas. Cualquier persona o institución puede descargarlas y usarlas para hacer sus propios modelos.

Observando factores como el gradiente de las aguas que caen en las altas montañas, los modeladores alimentan un modelo numérico en el que pueden simular la lluvia para establecer cómo el agua se infiltra y cómo baja por las montañas hasta llegar a las lagunas de los bordes del Salar.

El desafío de producir más litio extrayendo menos salmuera

Cuando SQM renegoció el contrato de arrendamiento con Corfo en 2018, uno de sus objetivos era aumentar su cuota de producción y venta de litio del Salar de Atacama. El nuevo contrato no permite extraer más salmueras de las que ya estaban permitidas anteriormente por la Superintendencia del Medioambiente. Pero lo que sí permite es acceder a cuotas adicionales de producción y venta si se aumenta la eficiencia. Es decir, de la misma gota de salmuera natural, rescatar más litio. Para cumplir las ambiciosas metas de producción para el litio, estaban obligados a aumentar la eficiencia.

La estrategia de pozos preferentes permitió al área de operaciones aumentar la eficiencia en las pozas, sacar más solución concentrada en cloruro de litio de la misma cantidad de salmuera y eso ayudó a acceder a más cuotas de producción.

Desde entonces varios clientes de la industria de electromovilidad le han preguntado con una mezcla de resquemor e intriga a Corrado Tore de qué manera la compañía piensa aumentar la producción de carbonato de litio equivalente a 240.000 toneladas anuales para 2030 si se va a bombear la mitad de salmuera. Parece una misión imposible, pero se está logrando paso a paso y de varias formas. Una de ellas es aumentar la eficiencia, perdiendo lo menos posible de litio en las pozas de evaporación, que es la misión de Gilbert Maldonado en la planificación de las pozas de evaporación, y de Kathy Ossandón y de Gabriel Meruane en la investigación de cómo optimizar los procesos. Otra estrategia del área de hidrogeología, es entregar la oferta de pozos productivos que tengan mejor concentración, para que sea posible obtener más litio de cada litro de salmuera. Los hidrogeólogos se encargan de mantener la oferta actual de pozos productivos funcionando y de extender su vida útil, para que cumplan su expectativa de química y de caudal. También recuperan pozos abandonados o dañados. Y perforan cada año cientos de pozos de estudio y exploración, de los cuales entrega entre tres y cinco por mes –los mejores en química y caudal– como pozos productivos.

El contrato renegociado con Corfo en 2018 no permite extraer más salmueras de las ya autorizadas por la Superintendencia del Medioambiente, pero daba acceso a cuotas adicionales de producción y venta si se aumentaba la eficiencia recuperando mayor cantidad de litio por gota de salmuera natural. Para cumplir las ambiciosas metas de producción, SQM estaba obligado a aumentar la eficiencia.



Como parte de su política de sostenibilidad ambiental, SQM se comprometió a reducir los flujos de salmuera extraídos del Salar de Atacama en un 50% para 2030. La estrategia de pozos preferentes permitió al área de operaciones aumentar la eficiencia en las pozas y obtener una solución más concentrada en cloruro de litio de la misma cantidad de salmuera.

La estrategia actual es dar prioridad a los pozos preferentes y una mantención más selectiva de los pozos que ya existen.

Los llamados pozos preferentes son una selección de 60 pozos privilegiados desde el punto de vista de la concentración de litio y químicas favorables al litio, mucho mayor que la del promedio de los otros pozos. Con sus salmueras se obtiene más CLE o Carbonato de Litio Equivalente. Por su gran valor productivo reciben un tratamiento de atención diferenciado. Esos son los pozos a los que los hidrogeólogos y los trabajadores de operación en minas, liderados por el jefe de operaciones Claudio Adones, tienen que dedicar mayor energía para que sigan funcionando y priorizar en caso de fallas. Todos los días son revisados uno por uno. Se mantienen, se limpian y se reparan periódicamente para alargar su vida útil. Se monitorea diariamente la evolución de su caudal y química. La estrategia de enfocarse en los pozos preferentes ha permitido producir más solución de cloruro de litio a partir de un menor número de pozos activos y menos volumen de extracción de salmuera.

Tal es la importancia que adquirió ese conjunto de pozos premium, que en 2021 implementaron medición telemétrica en la mitad de los pozos preferentes para monitorear sus indicadores en línea. Fueron habilitados sistemas de PLC en los flujómetros y sistemas de comunicación que permiten testear y levantar la información minuto a minuto. El PLC recoge toda la información sobre el caudal, horas de operación, nivel de profundidad de la salmuera y niveles dinámicos del pozo. Esa información se almacena en un *hardware* instalado afuera de cada uno de esos pozos y mediante señal de radio o celular se envía a una central donde un *software* ejecuta informes que se pueden revisar minuto a minuto por medio de indicadores en pantallas. Mediante ese sistema de control el área de operación de pozos puede observar al instante si el pozo está teniendo fallas, si está extrayendo menos salmuera o si requiere ser limpiado o mantenido.

Con el seguimiento continuo y comparando el caudal y el nivel de la salmuera en el pozo, se puede interpretar si el pozo perdió eficiencia.

En esos casos, hidrogeología le pide al área de operación que des-

Los pozos preferentes son una selección de 60 unidades privilegiadas desde el punto de vista de la concentración de litio y químicas favorables. Por su gran valor productivo, hidrogeólogos y trabajadores de operación les dedican mayor energía para que sigan funcionando.

pejen la plataforma, y toda la infraestructura para ir con los recursos de perforación a destapar todo lo que se derrumbó dentro del pozo para volver a entregarlo. En otras ocasiones introducen una sonda geofísica de conductividad eléctrica que mide la conductividad e indica si el pozo tuvo un cambio químico que esté generando problemas de salamiento o formando cuellos de botella. Estas herramientas ayudan a tomar decisiones de manera rápida para rescatar un pozo dañado.

El pozo favorito de toda la faena es el WV100. Es la estrella del Salar de Atacama, el número uno de los pozos preferentes. Los hidrogeólogos no pueden dejar fallar por ningún motivo al WV100, porque es el que más produce carbonato de litio equivalente. La hidrogeología de ese sector tiene muy buen comportamiento hidráulico y ese pozo la captura plenamente. El pozo WN100 está operativo desde 2015, del que se sacan entre 80 a 100 metros cúbicos por hora, con una excelente química. Por sus características es un pozo que no se ha podido igualar en el Salar. Se ha intentado hacer pozos en los alrededores para encontrar químicas y caudales parecidos, sin buenos resultados. Es parte de la naturaleza esquiva y a veces caprichosa de las salmueras.

Todos los pozos son distintos. Hay pozos con caudales de cinco litros por segundo, de un litro o de 20 litros por segundo. Todos van a necesitar

equipos y bombas de tamaño distinto, dependiendo de la distancia. Algunos están ubicados a 200 metros y otros a 14 kilómetros de donde está el sistema de distribución para las pozas de evaporación solar.

A medida que se explotan los pozos mediante la perforación y bombeo, la salmuera se va moviendo más rápido y puede cambiar su química. Cuando se mueve, pasa por zonas del Salar por las que nunca había pasado antes, con otros minerales y su química va variando. Hay una infinidad de factores en su entorno que pueden cambiarla, hacer que se disuelva o que precipite en forma de sales.

Un patrón de cambio importante que se ha visto en la salmuera es que hace 15 años estaba a menor profundidad. Hoy está en promedio un metro más abajo, como resultado de la explotación. No es homogéneo, hay sectores donde ha bajado más y otros en que ha bajado menos. El área de hidrogeología de SQM Salar explora este vasto yacimiento, mejora la estimación de los recursos disponibles y el conocimiento de cómo funciona el flujo de las salmueras en este medio poroso y trabaja en la simulación del yacimiento a futuro para adaptar la operación a la evolución de la siempre cambiante salmuera.

El aporte que hace el área de hidrogeología de SQM Salar es mejorar la estimación de los recursos disponibles, profundizar el conocimiento del flujo de las salmueras en ese medio poroso y simular el futuro del yacimiento para adaptar la operación a la evolución de la siempre cambiante salmuera.

Con el 2030 en el horizonte

2030 está marcado como una fecha importante en las simulaciones de hidrogeología, porque es el año en que termina el contrato de concesión con Corfo y es importante proyectar en qué estado va a estar el yacimiento y sus reservas futuras. El objetivo de SQM es negociar con el Estado una nueva concesión más allá de 2030. Para eso, la empresa tiene que estar en condiciones de proyectar con datos sólidos las reservas y características del yacimiento en 2030, 2035 y 2040. También debe ser capaz de compartir la información enriquecida durante más de 15 años del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama y demostrar que está preparada en términos tecnológicos para producir a partir de la salmuera que va a existir en 10, 15 o 20 años más.

Gracias a la robusta investigación hidrogeológica de SQM hoy se sabe mucho más sobre el Salar de Atacama. Este trabajo consolidado ha permitido a tener un entendimiento muy sólido del Salar, a nivel operativo y científico. Todo el mapeo del subsuelo, las reservas y las químicas de la salmuera está organizado, clasificado, reportado, fotografiado y es parte del patrimonio que SQM va a dejar en el Salar. Es un conocimiento que también queda para el Estado y es la base del futuro.

La exploración del yacimiento ha sido una positiva inversión porque no solo ayuda a ser más eficientes en la producción, sino que significa tener un mayor patrimonio en conocimiento que cuando comenzó la concesión. Cuando empezó la producción de potasio y litio en los años 90, toda la operación estaba concentrada en un trocito del núcleo, porque era de muy alta ley y los niveles de producción eran bajos. Gracias a la exploración y estudios, las reservas declaradas hoy son al menos cinco veces más grandes. En total, existe un depósito de 9,1 millones de toneladas de litio, que permite producir más de 45 millones de toneladas de carbonato de litio equivalente. Una cantidad que podría posicionar al Salar de Atacama como el principal proveedor de litio en un mercado mundial que hoy demanda 300.000 toneladas de carbonato de litio equivalente.

Eso es muy importante también de cara al Estado, porque demuestra que la empresa es un buen privado, que no solo explota los recursos naturales sino que los estudia de forma responsable y sin dañar al medioambiente. Hay una generación de valor muy importante, no solo para la compañía sino que para el Estado también.

El estudio hidrogeológico del Salar de Atacama como yacimiento y su monitoreo como ecosistema le ha otorgado más valor a un recurso natural que pertenece al Estado, con un yacimiento mejor y más abundante de lo que se conocía hace 15 años. Esto ayuda a tener una perspectiva de futuro esplendor para el litio durante decenas de años, ya sea que el operador siga siendo SQM, otra empresa, o el Estado.

Cuando empezó la producción de potasio y litio en los años 90, toda la operación estaba concentrada en un trocito del núcleo –de muy alta ley– y los niveles de producción eran bajos. Gracias a la exploración y a estudios, las reservas declaradas hoy son al menos cinco veces más grandes.







El Salar de Atacama, un depósito de litio único en el mundo

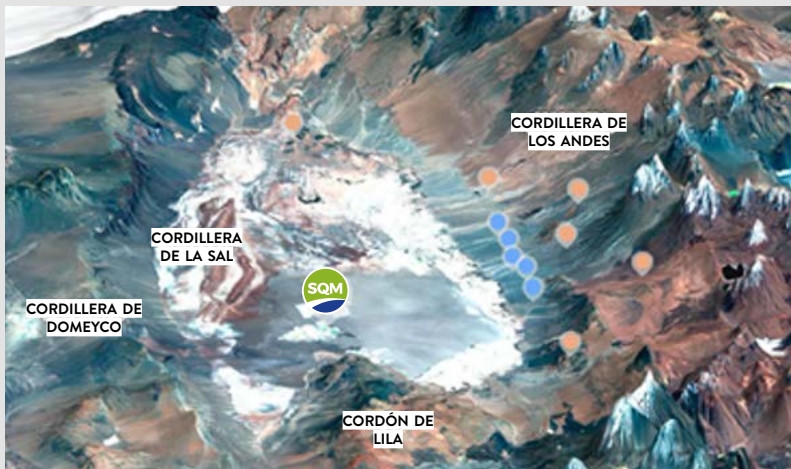
El Salar de Atacama, con una superficie de 3.000 km², es el más grande de Chile. Se emplaza en una cuenca endorreica limitada por dos franjas morfoestructurales de escala regional.

Por el oeste limita con la cordillera de la Sal, cuyas cimas alcanzan algunos cientos de metros por sobre el nivel del Salar. Se extiende por casi 80 km en dirección nornoreste a sursuroeste a los pies de la cordillera de Domeyko. Por el este,

la cuenca se encuentra limitada por la cordillera de los Andes. El Cordón de Lila, caracterizado por el afloramiento de rocas, conforma un rasgo morfotectónico único en la región y marca el límite austral de los depósitos evaporíticos que conforman el Salar de Atacama.

Como consecuencia de la tectónica y un clima árido, el Salar es una cuenca cerrada o endorreica que cubre una superficie superior a los 18.000 km².

Cuenca del Salar de Atacama.



PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS Y CLIMATOLÓGICAS

Altura (m)	2.300
Superficie de la cuenca (km ²)	18.100
Superficie del Salar (km ²)	3.000
Superficie de las lagunas (km ²)	12,6
Precipitaciones Salar (mm/año)	10 a 20
Precipitaciones cordillera (mm/año)	70 a 140
Evaporación potencial Salar (mm/año)	1.300 a 2.000
Evaporación potencial cordillera (mm/año)	2.100

En el Salar de Atacama están presentes la Zona Marginal y el Núcleo, que conforman dos unidades hidrogeológicas bien definidas.

Estas unidades cuentan con importantes acuíferos, ecosistemas de flora y fauna únicos, así como grandes reservas de minerales de potasio y litio, que en este subsistema de salmuera natural representa la principal fuente para la producción de litio en Chile. En el Salar de Atacama se han reportado las máximas concentraciones de litio que en cualquier otro sistema de salmueras continentales del mundo. Estas zonas de enriquecimiento de litio se concentran alrededor del Sistema de Fallas Salar (SFS), con contenidos medios en la cuenca en torno a los 1.400 mg/L.

En este Salar no solo se hallan extraordinarios contenidos de litio, también está muy extendido dentro del núcleo de halita y no solo dentro de un área específica. Se debe considerar que las concentraciones de litio superan los 1.000 mg/L en muchos sectores del núcleo, con máximos de hasta 5.000 mg/L en el sector sur, cerca del Cordón de Lila.

Zona Marginal

En esta zona rica en yeso y carbonatos de aproximadamente 1.480 km² se localizan los principales sitios de protección ambiental. Alberga ecosistemas lacustres como la Reserva Nacional Los Flamencos. La Zona Marginal se subdivide a su vez en la Zona de Limos y la Zona de Eflorescencias. La primera está constituida principalmente por arcillas y limos de origen aluvial, cementados localmente por cloruros y sulfatos. La Zona de Eflorescencias está localizada en una franja entre la Zona de Limos y el Núcleo, y está constituida por depósitos salinos de yeso, anhidrita, carbonatos y boratos. La Zona Marginal presenta afloramientos de una interfaz salina originada por el contacto de fluidos con diferente densidad, como la recarga de agua desde la cordillera de los Andes y la salmuera de alta densidad proveniente del acuífero de halita en el núcleo.



Superficie de halita en el Núcleo del Salar de Atacama.

El núcleo

El núcleo del Salar de Atacama alcanza una superficie de 1.400 km² y reúne grandes reservas de salmuera con altas concentraciones de litio y potasio, entre otros elementos de interés económico. El núcleo está constituido por una estructura porosa de halita y salmuera saturada en cloruro de sodio. La salmuera se encuentra ocluida en los poros relativamente uniformes e interconectados del núcleo. La porosidad disminuye drásticamente a profundidades sobre los 35 metros, dependiendo del área evaluada. El nivel freático en muchos sectores del núcleo está aproximadamente a un metro de profundidad. Cerca de la superficie la porosidad está en torno al 30%.

Superficialmente este acuífero forma una costra dura y filosa de halita de relieve muy irregular porque rara vez

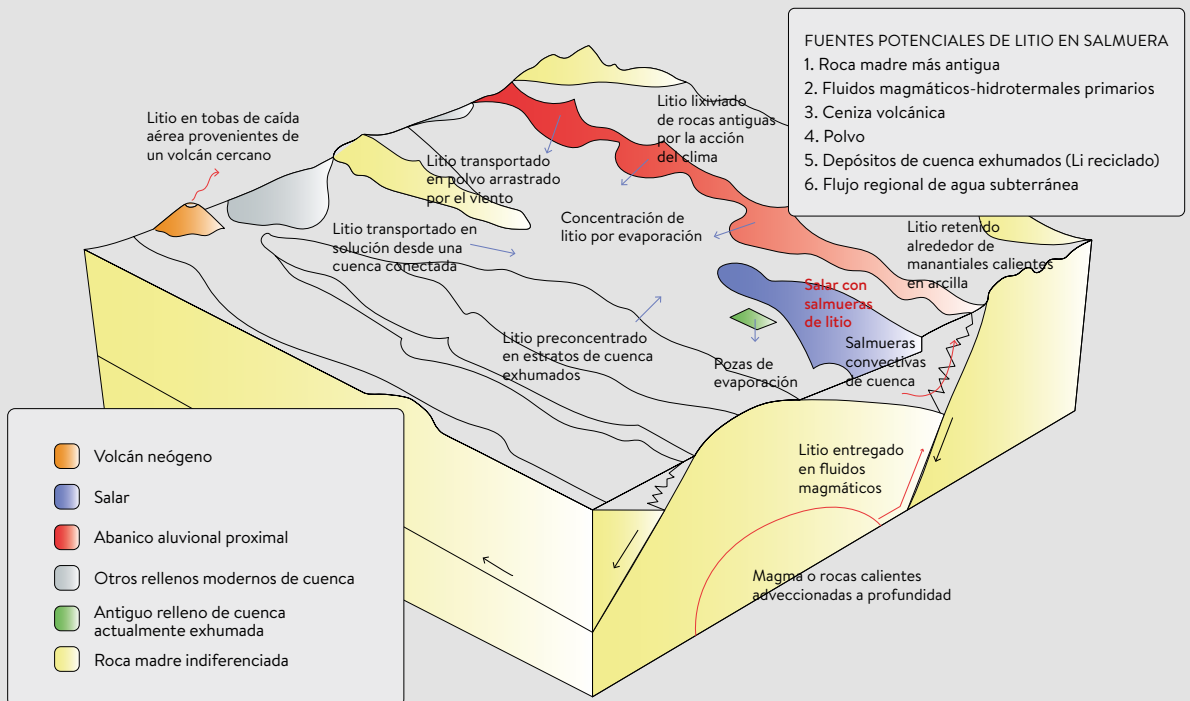
se inunda con agua superficial. Probablemente hay sectores del núcleo de halita que no se han inundado en cientos de años. Por otra parte, el gradiente de evaporación supera enormemente a los ingresos de agua superficial. La acumulación de halita se produjo desde el Mioceno y el Cuaternario en condiciones que alternaban entre un lago salino y un salar seco.

El núcleo está dividido en dos bloques por el Sistema de Fallas Salar (SFS). En el bloque oriental predominan las salmueras ricas en SO₄, en tanto en la parte occidental abundan las salmueras ricas en Ca-Cl. Los sistemas de Li-Mg se concentran en los alrededores del Sistema de Falla Salar y sistemas más cercanos al Cordón de Lila. La recarga del núcleo tiene su origen en la recarga de aguas superficiales y subterráneas, además de los fluidos geotérmicos de la región.

¿CÓMO SE ORIGINÓ EL LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA?

En general, la formación de las salmueras de litio en el mundo tiene su origen en los flujos de agua subterránea y aguas superficiales que convergen en cuencas endorreicas que, con apoyo de la evaporación, van concentrando solutos, dando lugar a la precipitación de sales y salmueras altamente concentradas. A diferencia del sodio, potasio y calcio, el litio es altamente soluble, por lo tanto no produce fácilmente evaporitas cuando se concentra por evaporación. Por el contrario, termina contenido en salmueras residuales en el subsuelo superficial.

Se han descrito distintas hipótesis para explicar el origen del litio en el Salar de Atacama. Los extraordinarios contenidos de este elemento siguen siendo foco de discusión dado que la salmuera necesariamente debió ser sometida a algún proceso de concentración posterior para llevar los bajos contenidos de litio desde la recarga diluida hasta los niveles hoy medidos en la zona más enriquecida alrededor de los Sistemas de Falla Salar. Entre las hipótesis se sugieren que el enriquecimiento de litio proviene de procesos de meteorización de rocas volcánicas a baja temperatura, fluidos volcánicos o la lixiviación hidrotérmica de sales subterráneos.

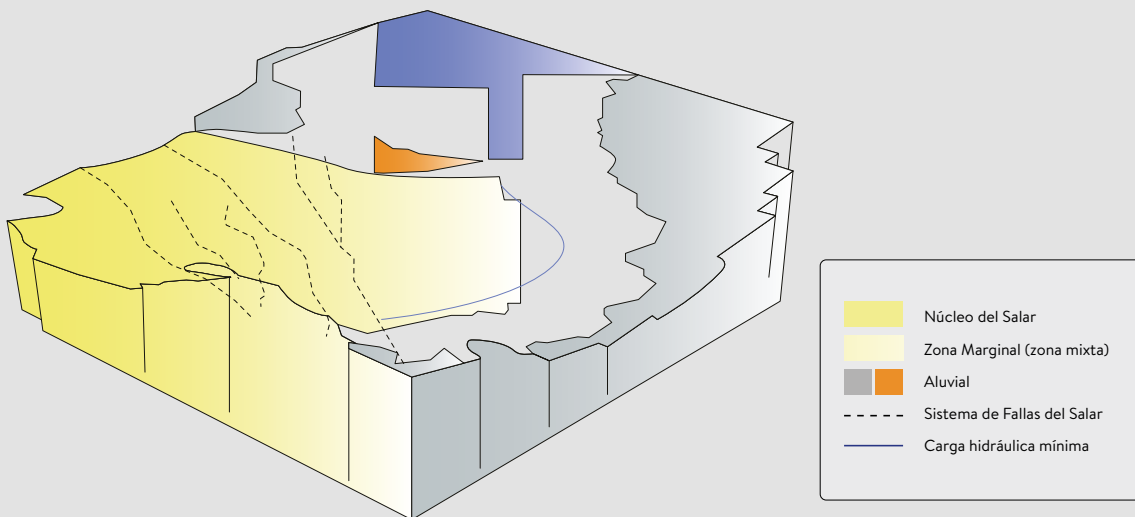


Origen del litio

Una hipótesis es que más de la mitad del litio en el núcleo de halita se origina desde el flanco oriental. En tanto, otros han planteado la importancia del Sistema de Fallas Salar (SFS) a lo largo de la cual se produciría el ascenso de los flujos de agua subterránea desde el oriente, alimentando de esta manera el acuífero de halita en el núcleo. Se ha estudiado además la posibilidad de que estos flujos de agua subterránea se evaporen en su ruta hacia el SFS, aumentando de esta forma las concentraciones de sales disueltas, entre ellas, el litio.

Marazuela et al. (2020) han sugerido como hipótesis la interacción de capas antiguas de sales y arcillas enriquecidas en litio y magnesio con la recarga diluida provenientes del flanco occidental, la cual aumenta rápidamente su densidad debido a la disolución de sales en la cordillera de la Sal. Se señala la importancia de los gradientes de densidad como agente impulsor del desplazamiento convectivo de los caudales diluidos, permitiendo de esta forma la removilización de capas antiguas enriquecidas en litio y magnesio en el Sistema de Fallas del Salar (SFS).

A través del modelamiento de flujos termohalinos subterráneos en el Salar de Atacama, los autores descartan una concentración evaporativa reciente de la recarga de agua proveniente del flanco occidental como principal mecanismo del enriquecimiento en litio. Esto, debido a la incompatibilidad espacial entre las salmueras ricas en litio y magnesio ubicadas en el SFS, y el sector de transición denominado carga hidráulica mínima (MHH). La incompatibilidad entre ambas divide la cuenca del Salar en dos sistemas hidrodinámicos aislados donde convergen las salmueras más evaporadas.







El litio y sus derivados producidos por SQM son fundamentales para industrias esenciales para el desarrollo humano como la salud, energías renovables, tecnología móvil y la movilidad sustentable. La venta de autos eléctricos con baterías de litio en 2021 duplicó a la de 2020 con 6,7 millones de unidades. La baja huella de carbono de los autos eléctricos ayuda a frenar el calentamiento global. Todo indica que la electromovilidad seguirá creciendo aceleradamente y por tanto, el litio cumplirá un rol importante frente a los desafíos del cambio climático.

Para seguir consolidando su rol como actor relevante en el desarrollo sustentable del mundo, SQM se puso como meta avanzar hacia la producción de un “litio verde”, lo que significa producir con el menor impacto posible, reduciendo la huella de carbono, optimizando el uso de agua y vinculándose de manera participativa con las comunidades aledañas a las operaciones del Salar de Atacama a través de programas que buscan propiciar su desarrollo desde sus propias necesidades y ambiciones.

La sostenibilidad del litio se transformó para SQM en un desafío estratégico y crucial para el futuro del negocio. Después de todo, la gran motivación detrás de la revolución del auto eléctrico es descontaminar el planeta y bajar las emisiones de CO₂. Por lo tanto, los mismos clientes están exigiendo que la industria minera y química que provee el litio, el cobalto, el acero, el níquel y todos los otros materiales con que se fabrica ese auto eléctrico sea sustentable.

Para cumplir con las crecientes exigencias a la cadena de valor del litio, los productos de litio de SQM incluyen en la ficha técnica no solo las especificaciones químicas y físicas, sino que también la huella medioambiental. En cada venta de litio se reporta la huella de carbono y también la huella hídrica y de energía.

Incluso hay clientes que van más allá en sus exigencias, como Volkswagen y otros fabricantes alemanes, que también evalúan a SQM y otros proveedores por las prácticas de inclusión y diversidad laboral, el porcentaje de mujeres contratadas y la colaboración con las comunidades locales. Revisan todos esos indicadores y si las prácticas de sus provee-

dores están muy alejadas de sus estándares, simplemente no compran el producto. Esta decisión no viene solamente respaldada por los valores del propio cliente, también está siendo acompañada por ciertas legislaciones, principalmente europeas, que van en esa dirección. Actualmente la Unión Europea está discutiendo una ley que va a obligar a todas las compañías que compran materias primas externas a hacer mediciones de sostenibilidad y buenas prácticas, con ciertos criterios definidos para aprobar la entrada de esos productos a Europa. La tendencia apunta a que las compañías que no sean capaces de cumplir con altos estándares de sostenibilidad ambiental y social simplemente van a quedar fuera del mercado.

SQM está colaborando en la creación de ese futuro y trabajando en el diseño de un “pasaporte” o identificador único de las baterías de los autos eléctricos junto a un consorcio de productores de cátodos, de la industria automotriz, Microsoft y varias entidades del rubro. El objetivo es que en tres o cuatro años cada auto eléctrico venga con un código QR que entregue información sobre su fabricante y proceso de fabricación, los materiales empleados, la huella de carbono, historial de reparaciones, huella hídrica, certificados de estándares de derechos humanos, medioambientales y de relaciones comunitarias.

Justamente por formar parte de la cadena de la electromovilidad, la industria del litio se está desarrollando con un estándar de sustentabilidad mucho más alto que la del resto de la minería. En proyectos nuevos de litio en Chile, como el de Maricunga, en Salar Blanco, el estudio ambiental ya dejó establecido que se iba a entregar el 3% de sus ventas a las comunidades indígenas de la zona. Por lo tanto, la sostenibilidad en todas sus vertientes es una meta a la que hay que entregarle dedicación, reflexión y recursos.

Un panorama muy distinto al de hace solo cinco años. En SQM, en 2018 ya existían iniciativas importantes, como el monitoreo medioambiental biótico de ecosistemas sensibles del Salar de Atacama. Pero faltaba crear una política integral de sustentabilidad, con metas ambiciosas y plazos definidos. Hasta entonces el foco estaba en ofrecerle al productor calidad al más bajo

costo y producir de forma responsable. Pero la sostenibilidad no estaba dentro de las prioridades. Eso empezó a cambiar radicalmente en 2019.

A principios de ese año se hizo una de las primeras reuniones para hablar de sustentabilidad con los gerentes y vicepresidentes de la compañía. Osvaldo Yáñez, gerente de innovación y desarrollo, levantó la mano y dijo: “Cuando entré a la compañía en 2001, la prevención de riesgos presentaba muchas oportunidades de mejora en SQM. ¿Cómo cambió? Cuando la seguridad pasó a ser uno de los tres valores de la compañía y el gerente general era el primero que decía ‘lo más importante es que nadie se accidente en nuestras faenas’. El resultado de ese cambio cultural fue una disminución notable de los indicadores de accidentabilidad. Si queremos que la sustentabilidad tenga esa importancia, tiene que estar dentro de los valores de la compañía. ¿No debería ser el cuarto valor de SQM?”. Hubo un silencio, y luego de más conversaciones y reuniones, la Sostenibilidad fue anunciada como uno de los cuatro valores de SQM, junto con la Excelencia, Seguridad e Integridad.

Se creó la gerencia de sostenibilidad de SQM, a cargo de Javier Silva, y definieron un Plan de Desarrollo Sostenible que la compañía hizo público en octubre de 2020. En este contexto, la empresa se fijó ambiciosas metas, como llegar a ser carbono neutral en las líneas de litio, cloruro de potasio y yodo en el año 2030. Un gran desafío, pero ya tienen bastante camino avanzado gracias a que 91,3% de la energía utilizada es renovable y limpia, mayoritariamente solar, y 2,6% de la energía proviene de la red eléctrica.

Actualmente SQM es el productor con menor huella de carbono del mercado y sigue trabajando en mejoras continuas en todas sus operaciones, con comités de seguimiento cada tres meses para alcanzar realmente la carbono neutralidad y motivar a todos los trabajadores y profesionales a involucrarse con la sustentabilidad.

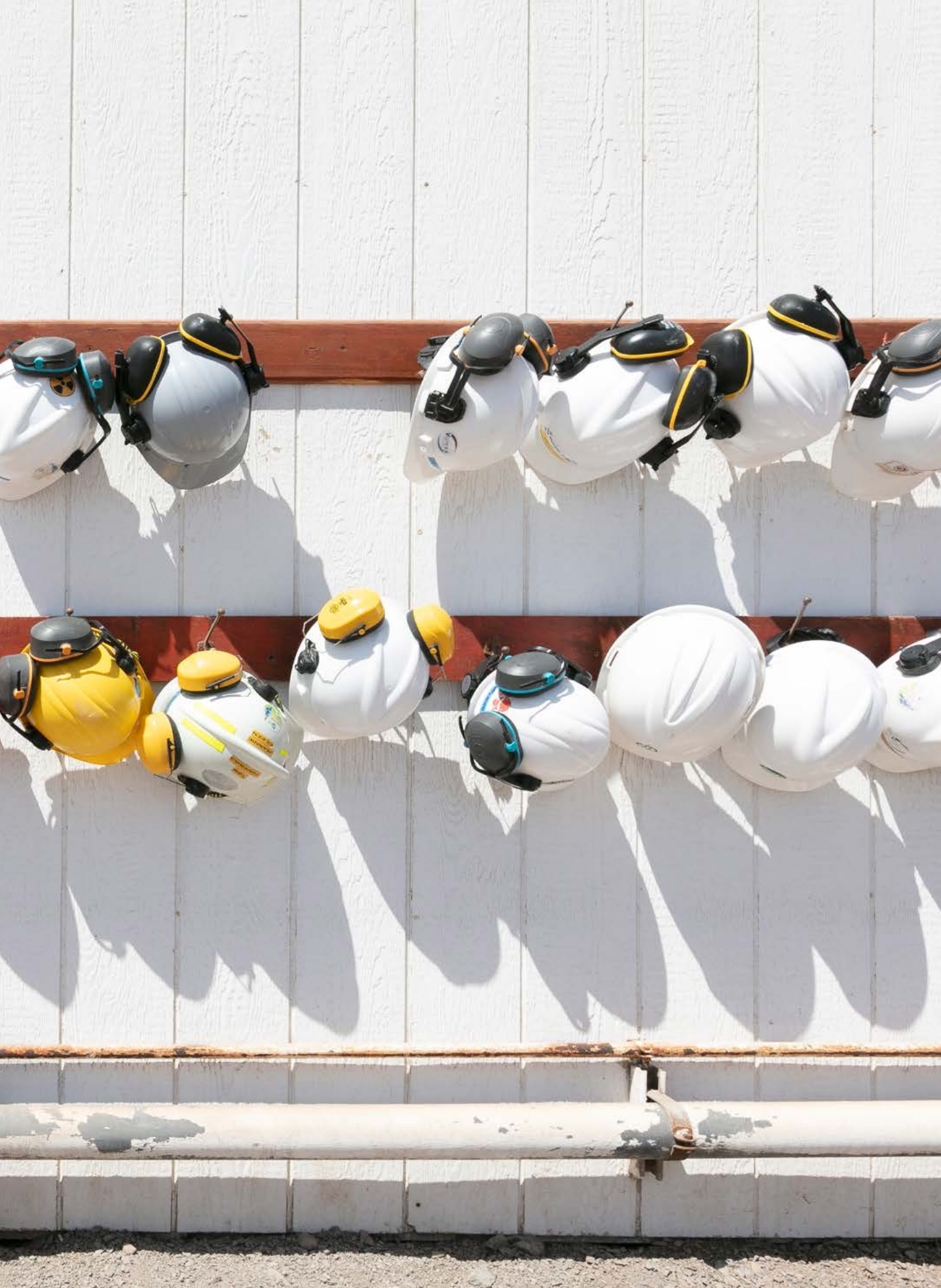
Fue el comienzo de un profundo cambio cultural en la compañía y tuvo una llegada en la gente que sorprendió a Javier Silva y a su equipo de sostenibilidad. En plena pandemia comenzaron a hacer capacitaciones

SQM es el productor con menor huella de carbono del mercado y sigue trabajando en mejoras continuas en todas sus operaciones, con comités de seguimiento cada tres meses para alcanzar la carbono neutralidad en 2030 y motivar a todos los trabajadores a involucrarse con la sustentabilidad.

en línea, totalmente voluntarias, en las que llegaron a tener 400 personas conectadas de un total de 1.500. Todo un récord para ese tipo de instancia en la compañía. Eran charlas sobre las metas de sustentabilidad de SQM. Algunas eran sobre el agua, otras sobre la energía, las comunidades del Salar o sobre los derechos humanos. También hubo una participación entusiasta en un concurso llamado “En vivo en equipo”, donde la gente postulaba con sus ideas de mejora. La agenda era libre, pero el 90% de las propuestas era sobre cómo reducir el uso de agua o ser más eficientes con el gasto energético. La sustentabilidad es un tema que los trabajadores sienten que les afecta a ellos: es su futuro, son sus familias y su rol en el mundo que les están dejando a sus hijos. Esa responsabilidad ha sido muy movilizadora.

El área de transporte de la empresa también está muy motivada con la sostenibilidad y está buscando activamente nuevas tecnologías. Parte de ese compromiso se ve en el uso de buses eléctricos para trasladar al personal de la Planta de Químicos de litio El Carmen a Antofagasta y en el uso de autos eléctricos dentro de las faenas e incluso un camión eléctrico de alto tonelaje para transportar sales. Actualmente SQM tiene la flota más grande de autos eléctricos de Chile en faenas mineras. En 2019 instalaron en El Carmen una electrolinera solar, la primera de Latinoamérica, que carga de energía a los autos eléctricos y se autoabastece con paneles solares.

La sustentabilidad es un tema que los trabajadores empiezan a sentir como propio: es su futuro, el de sus familias y el planeta que les dejarán a sus hijos. Esa responsabilidad ha sido muy movilizadora.





TOYOTA

TOYOTA 20

HAWKER
perfect plus

SKM
INDUSTRIAL

18

SASE

Sustentabilidad de los procesos productivos

En el Salar de Atacama uno de los aportes más importantes para mejorar la sostenibilidad de las operaciones ha sido disminuir la utilización de agua en los procesos del litio. El Plan de Sostenibilidad de SQM contempla como meta la reducción del consumo de agua continental en 40% para 2030 y 65% para 2040. Es una meta voluntaria, ya que la autorización ambiental que tiene SQM en la cuenca del Salar es de 240 litros por segundo de agua dulce. Pero el objetivo interno ha sido bajar el consumo y en 2019 ya estaban utilizando 180 litros por segundo y en 2021 lograron bajar a 120 litros por segundo.

Para lograrlo todos los equipos hicieron levantamientos de cómo se consumía el agua e iniciativas para reducir el consumo y aumentar la eficiencia y rendimiento. Desde mejoras muy sencillas, como limpiar y recircular agua de las purgas y reparar filtraciones, hasta investigaciones de alto nivel que implican cambios importantes en el proceso, lideradas por los equipos de operaciones, procesos e innovación y desarrollo.

El proceso productivo del litio en las operaciones del Salar utiliza muy poca agua. De hecho, la mayor parte del agua que consume SQM en el Salar se utiliza en las plantas de cloruro de potasio y la que sobra de esas plantas se reutiliza en el litio. El principal consumo de agua es para la limpieza de las tuberías y bombas que conectan las pozas y pozos, que se salan mucho con la salmuera. Esos lavados comenzaron a hacerse de manera más cuidadosa y con controles periódicos del agua utilizada, para ahorrar el recurso hídrico.

Otro compromiso importante de sostenibilidad fue reducir la extracción de salmuera. SQM tiene autorización para extraer 1.700 litros por segundo según la resolución de planificación ambiental. Como compromiso con las comunidades del Salar de Atacama, ya que este es un tema sensible para ellas, la compañía decidió internamente reducir la extracción de salmuera en un 50% hasta el 2028. Eso se ha ido logrando gradualmente y ha sido posible gracias a las mejoras del área operacional



El equipo de la gerencia de operaciones, liderada por Gilbert Maldonado, ha logrado de forma exitosa multiplicar por tres el despacho de salmueras en pozas hacia la Planta de Químicos de litio El Carmen. Y recuperar la mayor cantidad posible de salmuera de las sales cosechadas.

del Salar, por la inversión en tecnologías y la mejora en los rendimientos al enfocarse en extraer salmueras más ricas en litio y otras innovaciones, como rescatar el litio impregnado en las sales cosechadas de las pozas de evaporación. El gerente de operaciones Gilbert Maldonado y su equipo se enfrentan a un gran desafío. En tan solo unos años, han logrado triplicar con éxito el despacho de salmueras en pozas hacia la Planta de Químicos de litio El Carmen, mientras se esfuerzan por recuperar la máxima cantidad posible de salmuera impregnada en las sales cosechadas. El aumento del rendimiento ha permitido la paradoja de extraer la mitad de salmuera y aumentar al doble la producción de carbonato de litio equivalente en el mismo plazo.

Para cuidar la sustentabilidad medioambiental del Salar de Atacama SQM tiene alrededor de 225 puntos de control ambiental que miden y reportan en línea cómo va fluctuando el yacimiento de salmueras y las aguas subterráneas. En los sistemas ambientalmente sensibles, como Socor, Aguas de Quelana, Vegetación Borde Este y Peine, SQM tiene un sistema de alerta temprana que se activa en caso de que los umbrales de nivel de los pozos en estos sectores sean superados. En el caso de que se observen desviaciones respecto del comportamiento esperado, los operadores deben reducir inmediatamente el volumen de bombeo de agua o salmuera, con el objetivo de evitar el riesgo de afectar ecosistemas sensibles de la cuenca.

También se realizan análisis físico químicos de la salmuera, se hacen censos de las poblaciones de las aves y mamíferos del entorno del Salar y se monitorea la vegetación, los niveles y la calidad química de las lagunas del área marginal del Salar mediante análisis físicos químicos e imágenes satelitales. Desde 2006, SQM Salar tiene un programa de Seguimiento Ambiental Biótico, contenido en la RCA N° 226 del año 2006, diseñado en función de proteger los principales sistemas ambientales sensibles, principalmente de los componentes Vegetación, Flora, Fauna y Biota Acuática. El seguimiento ambiental biótico se compone de más de 500 parcelas o puntos de muestreo en terreno, que son agrupados en perfiles y sectores distribuidos a lo largo del borde este del Salar de Atacama.

La información generada en terreno es complementada con el análisis de imágenes satelitales de alta resolución. El análisis de la evolución en el tiempo de las variables estudiadas permite tomar medidas de control oportunas en caso de identificar cambios en ellas, y así mantener el sistema según lo acordado en los compromisos ambientales.

La gestión de residuos naturales

Las faenas de SQM no producen descartes mineros masivos como los relaves del cobre y otros metales. El principal descarte del litio es una sal, cloruro de sodio o sal de mesa, la misma que ya está en el Salar y que se cosecha de las pozas durante el proceso de evaporación solar. Estos cerros de sal apilados junto a las pozas no tienen contaminantes ni aditivos. En las faenas del Salar de Atacama no se les añade nada que no esté ya en la salmuera o superficie del Salar. Los procesos químicos se hacen en la planta de El Carmen, en las afueras de Antofagasta.

SQM tiene un plan de reducción del 50% de los residuos industriales para 2025. Por un lado, contempla reducir desechos propios del desgaste de materiales de la faena, como cartones, maderas, pallets y neumáticos. Y por otro, con iniciativas innovadoras, rescatar litio de las sales cosechadas de las pozas de evaporación, que quedan impregnadas en un porcentaje de cloruro de litio. Los acopios más nuevos de sales de bischofitas son depositados sobre geomembranas plásticas y se riegan suavemente con pivotes circulares para que la salmuera con litio decante nuevamente hacia unas canaletas y regrese a concentrarse en el sistema de pozas de evaporación.

En 2021 se hicieron las primeras pruebas industriales para afinar y patentar un nuevo proceso que producirá toneladas anuales de carbonato de litio equivalente a partir de sales de descarte del Salar de Atacama. Es un gran avance del área de investigación de SQM Salar para optimizar el uso de los recursos naturales: obtener más litio sin extraer más salmuera, a partir del reciclaje de los acopios.

El capital humano

El porcentaje de dotación femenina, la incorporación de personas con discapacidad y la contratación de personas provenientes de las comunidades cercanas a las operaciones son también considerados parte de la Política de Diversidad e Inclusión de SQM, que busca generar igualdad de oportunidades en la atracción de talentos. Estos tres indicadores tienen un seguimiento trimestral en todas las áreas y faenas productivas. Son considerados parte clave del Plan de Sostenibilidad.

La meta es llegar a fines de 2025 al 25% de participación de mujeres en la compañía. A fines de 2021 había un 18,2% de mujeres de dotación propia en la empresa, el porcentaje más alto dentro de la industria minera chilena, donde el promedio es 11% de mujeres. También hay en SQM un 17,1% de mujeres ejecutivas y 20% de mujeres en cargos relacionados con Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas. El plan de sustentabilidad empuja a seguir creciendo en esa línea, por el valor que tiene la diversidad dentro de la organización, ya que contar con distintas miradas ayuda a llegar a mejores soluciones.

En las faenas del Salar hay alrededor de 1.300 trabajadores y más del 20% son de comunidades indígenas del área. En 2018 los trabajadores de comunidades eran menos de un 8%, en parte porque algunos se habían ido a trabajar a otros destinos y en parte porque habían subido mucho las barreras de entrada.

Para fortalecer la vinculación con las comunidades y a la vez incentivar la participación femenina, SQM creó el Programa Aprendices, que durante tres meses capacita a una treintena de jóvenes para trabajar en las distintas operaciones del Salar. Al término de ese período se les ofrece un contrato para integrarse como rol general, con la opción de hacer carrera y llegar a roles de supervisor, como ha ocurrido en varios casos. Abrirse a la comunidad le aporta valor a la compañía. Un trabajador que vive a 40 minutos de las faenas y que tiene la oportunidad de llegar todos los días a su casa estará más motivado y tendrá mejor calidad de vida que uno que

La sustentabilidad e impacto medioambiental y social de la producción del litio de SQM es objeto de un gran escrutinio por parte de la opinión pública, de las autoridades ambientales que fiscalizan sagradamente y, cada vez más, de las propias fiscalizaciones de los clientes.

vive a diez horas. En gran parte gracias a esos programas, el porcentaje de dotación femenina aumentó de un 9% a un 13% en los dos últimos años. Son avances importantes en una faena que no es sencilla porque está a 220 kilómetros de la ciudad más cercana.

Hoy el desafío es llevar esos programas al siguiente nivel, para integrar también a profesionales jóvenes de las comunidades indígenas y se está trabajando en un levantamiento de brechas.

La mirada de derechos humanos también es algo relativamente nuevo para la empresa y también se está adoptando con decisión. En 2020 SQM publicó en su Plan de Sostenibilidad la Política de Derechos Humanos, que integra los Principios Rectores en su relación con todos sus grupos de interés y en la gestión sostenible del negocio. Como parte de esa labor se realiza una auditoría para evaluar, por ejemplo, el cumplimiento de los proveedores de esta política y comprobar que no estén trayendo insumos de países en conflicto o con trabajo infantil involucrado.

Estos avances de SQM han sido visualizados por mediciones externas, como DJSI –Índice de Sostenibilidad Dow Jones, que califica a la empresa para el índice DJSI Chile y DJSI MILA Pacific Alliance. También se trazó una afanosa ruta para alcanzar certificaciones de nivel mundial como IRMA (The Initiative for Responsible Mining Assurance), CDP Climate Disclosure Project, Ecovadis, Protect & Sustain y Conducta Responsable de ASIQUIM, entre otras.

La sustentabilidad e impacto medioambiental y social de la producción del litio de SQM es objeto de un gran escrutinio y alta exigencia por parte de la opinión pública, de las autoridades ambientales que fiscalizan sagradamente y, cada vez más, de las fiscalizaciones de los mismos clientes. En solo dos semanas de marzo de 2022 Corrado Tore, gerente de hidrogeología Salar en SQM, recibió visitantes de las casas automotrices BMW de Alemania, Scania de Suecia y a un grupo de fabricantes de baterías que querían conocer de primera fuente las operaciones en el Salar de Atacama.



PRECAUCIÓN
SUSTANCIAS
TÓXICAS



Todos estos grandes productores tenían la misma preocupación: comprobar si SQM maneja de manera responsable los recursos naturales, si tiene una buena relación con las comunidades del Salar, si cumple estándares de protección de los derechos humanos y si mide el impacto ecosistémico en las lagunas y poblaciones de flamencos de la zona limítrofe, la huella hídrica y de carbono de las operaciones. Escuchan, preguntan y son críticos, porque la opinión pública les exige que sean estrictos con sus proveedores. Algunas de estas empresas también contratan a auditores expertos que estudian el Salar de Atacama de forma independiente, conversan con las comunidades y emiten su opinión. No solo empresas privadas están interesadas en evaluar la sustentabilidad del litio de SQM, también vienen entidades de gobierno, como el Servicio de Geología de Alemania. En marzo de 2022 visitaron el Salar porque Alemania es un gran productor de autos y existe una gran sensibilidad de la opinión pública de ese país y de los clientes de Volkswagen, BMW y Mercedes Benz que están lanzados a la revolución eléctrica.

Los grandes productores del mercado de baterías visitan y auditan el Salar con la preocupación de comprobar si SQM tiene una buena relación con las comunidades, si cumple estándares de protección de los derechos humanos y si mide el impacto ecosistémico, la huella hídrica y de carbono de las operaciones. Escuchan, preguntan y son críticos, porque la opinión pública les exige que sean estrictos con sus proveedores.

La cocreación con las comunidades

Uno de los aspectos más importantes y desafiantes del Plan de Sostenibilidad de SQM es el relacionamiento con las comunidades del Salar de Atacama. SQM mantiene con Corfo un contrato de arrendamiento que implica entregar al país sobre el 50% del margen bruto de la operación del litio, lo que permite financiar diversos programas de desarrollo social. A esto se suma la contribución que hace SQM, en el marco del contrato con Corfo, al desarrollo regional del 1,7% de los ingresos de la compañía, que solo en el año 2022 fueron más de 180 millones de dólares en total para el Fondo de Desarrollo Regional y los municipios de María Elena, Antofagasta y San Pedro de Atacama. También se realizan aportes por un total de 200 millones de dólares hasta el 2030 a la creación del Instituto de Investigación de Energías Limpias con sede en Antofagasta. Y el compromiso de aportar a las 21 comunidades atacameñas del Salar de Atacama entre 10 y 15 millones de dólares al año para proyectos de fomento sustentable asignados por Corfo.

En el Salar de Atacama viven cerca de 10.000 personas, que aumentan a 15.000, si se considera la población flotante, ya que es la zona turística más visitada del país. De los habitantes del Salar, cerca de 5.000 se reconocen como pueblos originarios y cerca de 2.500 están inscritos en alguna de las 21 comunidades indígenas que hay establecidas en el territorio. En 2018 SQM creó el equipo de relacionamiento comunitario, que tiene como principal misión vincularse formalmente con las comunidades indígenas del territorio e impulsar un cambio cultural interno en los distintos equipos de SQM Salar.

La compañía realiza numerosas charlas y capacitaciones, comenzando por los trabajadores nuevos, para que se entienda mejor el territorio en que están inmersos, cuáles son los pueblos originarios y las culturas que están presentes desde hace siglos, cuál es el estándar de comportamiento con las comunidades y porqué son relevantes para SQM. Muchos trabajadores que trabajan en turnos 7x7 desde Antofagasta, La Serena o

Santiago llegaban a trabajar a la faena y volvían a sus casas, entonces no habían tenido el tiempo para relacionarse realmente con las comunidades del territorio. Durante esas charlas los supervisores están muy motivados por entender mejor a sus trabajadores de comunidades. Preguntan, por ejemplo, sobre la celebración del primero de agosto, que es el Año Nuevo para pueblos de cultura andina y se celebra con pagos a la tierra.

Esas fechas, que son muy significativas para los pueblos atacameños, hoy son otorgadas como dos días libres para los trabajadores de comunidades inscritos en la Conadi. Hace dos años, Alejandro Bucher, vicepresidente de medioambiente y comunidades de SQM Salar, fue invitado a la celebración del primero de agosto en Talabre, que se festejó con agradecimientos a la madre Tierra y un gran almuerzo comunitario. Durante el almuerzo, un trabajador se le acercó y le dijo: “Oiga, ¿sabe qué? Primera vez que nos dan permiso para salir el primero de agosto a nuestra celebración, que es la más importante que tenemos”.

Hay otras actividades que también son importantes y se están incorporando en los días libres, como la limpia de canales para el riego agrícola, que son trabajos colectivos que se hacen dos o tres veces al año en algunas comunidades. En esos casos la directiva de cada comunidad envía los nombres de las personas y la fecha requerida y los jefes de operación otorgan permiso.

Hasta hace algunos años, las necesidades locales no estaban incorporadas en la cultura de SQM. Esa falta de diálogo y desconexión es lo que está cambiando.

El equipo de relacionamiento comunitario está conformado por ingenieros agrónomos, sociólogos, una abogada, técnicos agrícolas y relacionadores comunitarios. La mitad del equipo son atacameños que provienen de Peine, Toconao, Lasana y San Pedro de Atacama.

Asimismo, la política de responsabilidad social no consideraba si los proyectos eran pertinentes o culturalmente adecuados, tampoco los definían junto a las comunidades. Esas maneras de relación asistencialistas y poco horizontales son las que la empresa está dejando atrás.

El equipo de relaciones comunitarias está dedicado a formalizar las relaciones con las comunidades por medio de convenios, mesas de trabajo y la cocreación de soluciones con escucha activa y sobre todo con respeto. Las principales preocupaciones y reclamos de las comunidades suelen ser medioambientales, ya que su interés es resguardar el territorio. Eso implica, en algunos casos, hacer un monitoreo ambiental participativo con gente de las comunidades que acompañan la toma de muestras en zonas de su interés. En otros casos, la empresa financia y compra los equipos de medición y la contratación de especialistas en hidrología para que la misma comunidad haga su propia medición independiente y sentar las bases para construir confianza y transparencia entre las partes. Algo que ha costado muchos años alcanzar.

Actualmente hay cinco convenios de relacionamiento a largo plazo firmados con las comunidades de Camar, Toconao, Talabre y Río Grande, que regulan la relación entre la empresa y cada comunidad hasta 2030. Están basados en los principios rectores de derechos humanos de las Naciones Unidas y con el reconocimiento formal de SQM de que su proyecto se realiza en un territorio indígena. En esos convenios se establece explícitamente cuáles van a ser todos los temas que se van a conversar para llegar a acuerdos en mesas de trabajo conjuntas.

Las comunidades en su mayoría trabajan un Plan de Vida, que es un documento que define lo que quieren de su comunidad a cinco y a diez años. Finalmente se establece un aporte de la empresa para financiar proyectos en beneficio para la comunidad, que cumplan con el convenio 169 de la OIT de debida diligencia en derechos humanos y con el objetivo de la compañía de ser un actor en el desarrollo local. La comunidad indígena es soberana de esos aportes; define en qué los va a usar y realiza licitaciones para contratar la ejecución de los proyectos.



Recuperar la agricultura

En los convenios con las comunidades se trabajan temas de educación, patrimonio, servicios básicos y desarrollo productivo, especialmente en la agricultura, ya que las comunidades se reconocen a sí mismas como culturas agricultoras y SQM también es una empresa que desde sus orígenes salitreros ha trabajado con agricultores.

Las comunidades atacameñas de la zona alta de la cordillera tradicionalmente dependen y se alimentan de la vida animal, de sus llamas principalmente. Aún se conserva la crianza de animales y con la pandemia esa tradición retornó con fuerza. Los animales son parte de la comunidad y de la familia. Si se pierde una llama suben en grupo hasta lo alto de las montañas a buscarla. Por eso los proyectos agrícolas que más piden las comunidades son los cultivos de alfalfa para alimentar sus ganados.

El agrónomo Benji Fuenzalida, a cargo de los proyectos agrícolas con comunidades, recuerda que él llegó muy empeñado en aplicar técnicas productivas como el riego por aspersión y por goteo para reemplazar técnicas tradicionales que él consideraba ineficientes, como el riego por inundación o de canales. Pero terminó aprendiendo que muchas de estas tradiciones de las zonas andinas respondían a un conocimiento en base a la experiencia.

En Río Grande, por ejemplo, una comunidad atacameña a 90 kilómetros de San Pedro, los agricultores no iban a cambiar su sistema de riego por inundación por sistemas más eficientes, porque en esa zona la salinidad del agua es mucho más alta y al cambiar a un sistema más eficiente, se salinizan los suelos. Para evitar eso, hay que aplicar mucha más agua, es decir, ser ineficiente para lavar las sales. De otro modo, sus cultivos se mueren. Por ese mismo motivo, por la salinidad de las aguas y la topografía, comunidades como Río Grande, San Pedro y Catarpe suelen desarrollar sus cultivos en la parte alta, sobre los 3.000 metros de altura, porque la calidad del agua es mejor, más dulce y la salinidad aflora en la parte más baja.

Sin embargo, aunque en Río Grande no fueran a cambiar sus téc-

En Río Grande, una comunidad atacameña a 90 kilómetros de San Pedro, tenían hace muchos años el anhelo de transformar la localidad de Yerbas Buenas en un valle agrícola. Para eso necesitaban arreglar la tierra y llevar agua. SQM cocreó un proyecto con la comunidad para construir dos embalses y líneas de impulsión con energía solar.

nicas tradicionales, sí estaban dispuestos a probar nuevas tecnologías en otro sector. Tenían desde hacía muchos años un anhelo de transformar la localidad de Yerbas Buenas en un valle agrícola. Para eso necesitaban arreglar la tierra y llevar agua hasta allá. Con esa comunidad SQM cocreó un proyecto para construir dos embalses y líneas de impulsión desde el río Grande hasta Yerbas Buenas con energía solar. La comunidad dividió ese terreno en parcelas y las plantó con alfalfa a principios de 2021 y construyó un sistema de riego con aspersores. Actualmente hay gente joven de la comunidad que se trasladó a vivir a ese valle y se está construyendo casas. Es un proceso de repoblamiento y revitalización agrícola en el que Benji Fuenzalida se involucró intensamente, quedándose a dormir en el poblado y siguiendo de cerca el control de plagas, canales de riego tapados y todos los pormenores.

Cuando llegó la minería del cobre al territorio, muchos años antes, gente de la comunidad se fue a trabajar a las minas. Les decía a sus hijos: “Vayan a trabajar para allá, no quiero que tú seas agricultor como yo y pases las mismas pellejerías, quiero que tengas otra vida”. Hoy la reivindicación es al revés, quieren recuperar ese patrimonio, esa vida de agricultor con todas sus tradiciones, porque sienten que la perdieron. Hay jóvenes muy activos, algunos de ellos profesionales, que estudiaron y trabajaron afuera y volvieron como líderes comunitarios, tratando de recuperar sus campos.

Es el caso de Pamela Condori Cruz, oriunda de la comunidad Santiago de Río Grande, que emigró para estudiar y en 2002 volvió a hacerse cargo del jardín infantil. Junto a otros jóvenes de Río Grande gestionó el sueño de habilitar 30 hectáreas nuevas de alfalfa en el sector de Yerbas Buenas, a 15 kilómetros de distancia, para entregar tierras a las nuevas generaciones de la comunidad, que querían retomar la tradición agrícola de sus padres y abuelos, pero no tenían terrenos. Era un gran desafío, porque el agua alcanzaba para esas 30 hectáreas, pero había que traerla y canalizarla en altura, a una cota de 70 metros, desde una quebrada a cuatro kilómetros de distancia. Golpeando puertas en la Conadi, el municipio y empresas para buscar recursos, llegaron a SQM.

En 2018 la comunidad de Río Grande firmó un convenio con la empresa para sanear los célebres cultivos de ajo de la zona. Y luego, en 2021, se concretó el ansiado proyecto de cultivar alfalfa en Yerbas Buenas, a más de 3.000 metros de altura. SQM apoyó con el financiamiento de las bombas, piscinas acumuladoras de agua y el kit completo de la planta fotovoltaica. En marzo de 2021 se sembraron con alfalfa las primeras dos hectáreas del total de 30 proyectadas, regadas con aspersores para cuidar cada gota de agua. La tecnología y el riego tecnificado es algo nuevo para la comunidad, que está acostumbrada a hacer riego por canal. “Nosotros vamos a tener que ser los pioneros. Demostrar que aquí arriba también se puede hacer agricultura con responsabilidad y compromiso. Para nosotros es regresar con la madre Tierra, volver a nutrirse de lo que uno trae, porque la agricultura la llevamos en nuestra sangre”, dice Pamela Condori. Varios de los jóvenes se están construyendo sus casas junto a los brotes nuevos de alfalfa que alimentan a los conejos, cabras, llamas y burros de la comunidad. También levantaron una sede comunitaria en el lugar pegando bloques de cemento con sus propias manos, en una minga. Optaron por hacer aquí su futuro.

SQM está apoyando fuertemente ese trabajo de recuperación de la actividad tradicional de agricultura y viendo con cada comunidad cómo conjugarla con tecnologías, como el riego por goteo, subterráneo o con aspersores y hacerlas compatibles con sus prácticas históricas. De eso se trata la cocreación, de que las personas de las comunidades tengan la oportunidad de elegir cuál es el camino que quieren seguir en base a lo que anhelan y necesitan.

“Vamos a tener que ser los pioneros y demostrar que aquí arriba también se puede hacer agricultura con responsabilidad y compromiso. Para nosotros es regresar con la madre Tierra, porque llevamos la agricultura en nuestra sangre”, dice Pamela Condori, dirigente de la comunidad Río Grande.

Camar, el primer pueblo solar

En Camar, un histórico pueblo atacameño situado en un oasis en el borde este del Salar de Atacama, frente a las operaciones de SQM, inauguraron en agosto de 2021 una planta fotovoltaica para dotar de energía eléctrica al pueblo de 120 habitantes. Es la primera localidad de la zona que tiene energía fotovoltaica 24 horas al día. Es un proyecto absolutamente creado, revisado y ejecutado por la misma comunidad.

Lorenzo Mendoza, vicepresidente de la comunidad de Camar, fue parte importante de las mesas de trabajo con SQM durante 2020 y 2021 que llevaron al convenio de relacionamiento. Él recuerda que dos años antes de las conversaciones, en 2018, escribieron un plan de desarrollo con la participación de toda la comunidad de Camar donde quedaron plasmadas todas las necesidades que tenían. Pese a ser una comunidad antigua, de más de 120 años, con iglesia de adobe y cultivos tradicionales de maíz, les faltaban los servicios básicos: luz eléctrica, agua potable, alcantarillado, y por eso se sentían abandonados por el Estado. Solo tenían tres horas de luz diarias gracias a un generador en base a combustible. La municipalidad los abastece de agua potable en estanques, que llenan con camiones aljibes.



Lorenzo Mendoza, vicepresidente de la comunidad de Camar, y Manuel Tejerina, encargado técnico de la planta fotovoltaica y también miembro de la comunidad.



Camar es la primera localidad de la zona con energía fotovoltaica 24 horas al día. Es un proyecto absolutamente creado, revisado y ejecutado por la comunidad atacameña.



El agua corriente que viene de vertientes está contaminada con arsénico y la usan solo para regar y para los baños, pero no se puede beber. La idea de instalar una planta fotovoltaica grande, que abasteciera de energía a todo el pueblo y energizara una planta potabilizadora de agua fue una idea que ya rondaba desde 2015 y que no habían podido concretar por falta de recursos.

En 2020 entablaron conversaciones con SQM y les propusieron sus ideas –incluyendo la planta solar fotovoltaica– y también los obstáculos que veían para relacionarse, porque “SQM tenía una deuda histórica con Camar”, según Lorenzo Mendoza. La empresa tenía unos pozos de agua subterránea en los territorios frente a Camar y la comunidad quería que los cerraran, porque les preocupaban los bofedales de esa zona y temían que hubiera algún efecto futuro sobre las vertientes.

En 2021, atendiendo a los impactos medioambientales, SQM cerró el pozo Camar 2, que era la condición más sentida de la comunidad para sentarse a conversar. También acordaron formar un equipo de medioambiente en Camar que monitoree los pozos aledaños a Camar 2 en conjunto con SQM para hacer seguimiento de cómo reaccionan el sistema y los caudales. “La relación con SQM mejoró, ahora ellos están disponibles a hablar de los temas que puedan afectar a la comunidad y a las necesidades nuestras; cosa que no era así hace diez años cuando les pedíamos hablar y no nos hacían caso”, dice Manuel Tejerina, encargado técnico de la planta fotovoltaica y miembro de la comunidad.

De ese convenio nacieron los recursos para implementar el sueño de la planta fotovoltaica, que comenzó a funcionar el 26 de agosto de 2021. La instalación tiene 56 paneles solares y es operada por Manuel Tejerina, que fue capacitado para su operación técnica. La planta tiene capacidad para 150.000 watts por hora y solo consume 35.000 watts en las horas punta. Se hizo pensando en el crecimiento del pueblo en los próximos 15 años.

La inauguración de la planta fue celebrada con emoción porque era un gran anhelo para la comunidad. Les cambió la calidad de vida a las familias, que pueden tener refrigerador, horno, televisión y lavadora

En 2021, SQM cerró el pozo Camar 2, que era la condición más anhelada de la comunidad. También se acordó formar un equipo de medioambiente en Camar para monitorear los pozos aledaños en conjunto con SQM. “La relación con la empresa mejoró, ahora están disponibles a hablar los temas que puedan afectar a la comunidad. No era así hace diez años”, dice Manuel Tejerina, miembro de la comunidad.

conectados las 24 horas. Los adultos mayores y los niños ahora pueden comer carne, yogures, helados y trabajar con computadores en la escuela del pueblo. De iluminarse con velas en la noche pasaron a tener lámparas encendidas. También potenció un polo de desarrollo. En el pueblo hay varios microempresarios que tienen equipo de construcción, una fábrica de ladrillos de cemento ecológico o soldadora de estructuras metálicas que ahora pueden conectar sus maquinarias al sistema de alimentación del pueblo y trabajar tranquilamente durante todo el día. Antes solo podían usar sus equipos durante un par de horas, el sistema se caía por sobrecarga y empezaban los reclamos entre los comuneros.

En 2022 se inauguró un segundo proyecto de tratamiento de agua para tener agua potable, y un tercero para normalizar la red de alcantarillado y tener los servicios básicos cubiertos y autosuficientes. El acceso a agua potable era una prioridad en el pueblo, por salud y porque las autoridades sanitarias lo exigen para poder abrir negocios de venta de alimentos o de servicios turísticos. Mientras se prepara el proyecto de planta potabilizadora de agua, SQM lleva agua potable en camiones aljibe para asegurar el consumo de Camar.

En la vicepresidencia de medioambiente y comunidades están convencidos de que los aportes del litio pueden tener un efecto positivo y multiplicador a nivel local. Sumando los aportes que entrega SQM directamente a las comunidades a través de estos convenios de relacionamiento, más el aporte que se entrega a través de Corfo, y considerando los aportes que hace Albemarle, se está entregando mensualmente más de un millón de pesos por habitante. Es una inversión mayor a lo que existe en cualquier otra zona de Chile. “La plata ya está. El gran desafío es cómo lograr que estos recursos realmente se traduzcan en desarrollo. Si esto lo hacemos bien, lo que requiere el trabajo conjunto de comunidades, autoridades y empresas, de aquí a 2030 podríamos tener desarrollo”, dice al respecto Alejandro Bucher.

El mundo después del litio

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

por Stanley Whittingham

Stanley Whittingham, Nobel de Química 2019 por su relevante investigación que permitió el desarrollo de la tecnología de las baterías en base a ion litio, en enero de 2022 dio una charla en Chile en el Congreso Futuro llamada *El mundo después del litio*. Estos son algunos extractos: “El cambio climático está alterando nuestras vidas, como lo muestran estos pocos ejemplos de los últimos 12 meses: inundaciones en Alemania, tornados en Kentucky, Estados Unidos, los recientes incendios en Chile y también los recientes incendios en Colorado. Vamos a tener que adaptarnos al cambio climático. No hay nada que podamos hacer

para revertir los niveles del clima a cómo eran hace 30 años, pero podemos evitar que se vuelva mucho peor. Eso significa que como humanidad tendremos que deshacernos de los combustibles fósiles tan rápidamente como podamos. Las energías limpias y renovables van a ser el futuro. En la mayor parte del mundo las energías solares y eólicas van a ser las dominantes, pero el desafío es que son intermitentes, por lo tanto el almacenamiento es crítico. Por su capacidad de almacenamiento portátil las baterías de litio sostienen una ventaja. En cuanto a transporte en los próximos 10 o 15 años, en las

ciudades más grandes, y quizás también en Santiago, los motores de combustión interna serán prohibidos. Para las generaciones más jóvenes los vehículos autónomos eléctricos serán probablemente la norma. La gente ya no va a tener auto propio, sino que los autos vendrán a buscarte a tu puerta, te dejarán donde necesitas y podrás leer tu teléfono en el viaje ya que serán autónomos. El transporte y la red de electricidad van a pensarse de manera unida para una mayor resiliencia. La sostenibilidad es otro desafío. Ya que actualmente, se necesitan entre 5 y 80 kg de energía para cargar una batería de

litio. Para producir litio se viaja muchos miles de millas desde la mina misma hasta el producto final. Por lo tanto, hay que hacer más para superar e incrementar el valor desde la fuente misma de los recursos naturales. Cada país o al menos cada región necesita tener su propia cadena de suministro y su propia infraestructura. Y lo que tenemos que lograr con avances científicos es eliminar elementos críticos de las baterías que no podemos conseguir localmente. Por ejemplo, el cobalto, que ahora ha bajado a menos de 5% en las baterías actuales. Y también debemos disminuir elementos como el grafito, que deben ser

conseguidos localmente.

Chile está en una gran posición, ya que tiene los recursos minerales para construir una cadena de suministro de las baterías y, de hecho, podría construir baterías. Tiene la mayor fuente de litio en el mundo y tiene mucha luz solar para la generación de energía limpia. Y la capital, Santiago, tiene el clima que le gusta a los vehículos eléctricos, parecido a San Francisco, en California. Así que Santiago podría llegar a ser una ciudad modelo de energías limpias para Sudamérica y para el mundo. Y quizás en 15 años ya no tengan vehículos de combustión interna.

Pero hay desafíos. La minería,

como ya se sabe, necesita tecnologías más limpias, tiene que usar mucho menos agua de la que usa hoy. Hay una propuesta para hacer en Chile un Instituto para Tecnologías Limpias que aborde tales retos. Concluiré diciendo que el cambio climático causará interrupciones en todas nuestras vidas con incendios, inundaciones, etc. Tendremos que adaptarnos y es mejor si estamos en el lado del control activo. Chile tiene la posibilidad de tomar un rol preponderante en comparación a la mayoría de otros países”.

¿Qué distingue al litio de SQM?

Proceso productivo

**PROPIO,
INNOVADOR,
DE ESTÁNDAR
MUNDIAL**

Salmueras que contienen un **0,2%** de litio se transforman en carbonato de litio de **99,91%** de pureza.

**ALTA
CALIDAD**

Los productos de litio van **directo al cliente final** para uso en baterías y otras aplicaciones.

Posee una de las **huellas hídricas y de carbono más bajas** de la industria.

**REPORTABILIDAD Y
FISCALIZACIÓN**

Sistema de monitoreo en línea, **IRMA**, Plan y Reporte de Sostenibilidad.



Recuperación de litio desde baterías

Eliana G. Pinna⁽¹⁾, Daniela S. Suárez⁽¹⁾,
Norman Toro⁽²⁾ y Mario H. Rodríguez⁽¹⁾

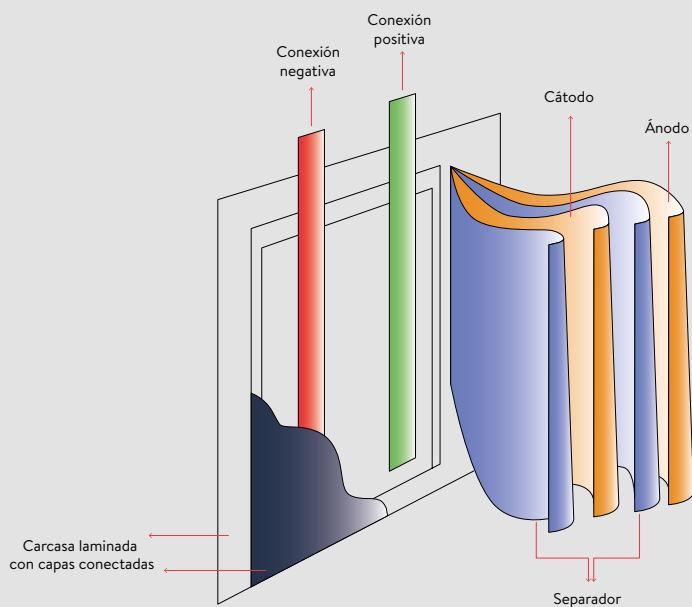
⁽¹⁾ Laboratorio de Metalurgia Extractiva y Síntesis de Materiales (MESiMat), Instituto Interdisciplinario de Ciencias Básicas (ICB)-UNCuyo-CONICET-FCEN, Padre J. Contreras 1300, Parque General San Martín, Mendoza CP M5502JMA, Argentina.

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Arturo Prat, Iquique 1100000, Chile.

INTRODUCCIÓN

Las baterías ion litio son, actualmente, la principal fuente de energía de los aparatos electrónicos, tales como máquinas fotográficas, teléfonos celulares, computadoras personales, herramientas portátiles, filmadoras, vehículos híbridos y eléctricos, entre otros. Esta gran cantidad de aplicaciones se debe principalmente a sus características excepcionales, tales como:

- Alta densidad de energía.
- Alto voltaje 3,7 V.
- No poseen efecto memoria.
- Baja tasa de autodescarga.
- Larga vida útil.
- No necesitan mantenimiento.
- Amplio rango de temperatura de operación.



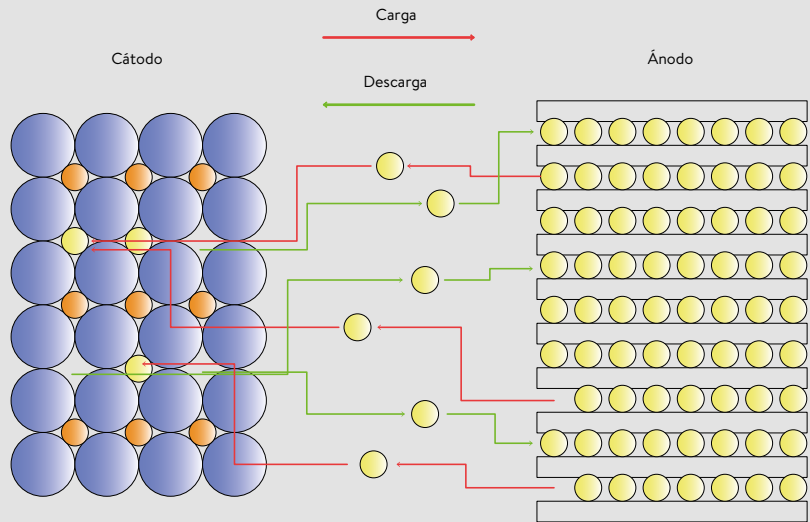
Batería ion litio.

COMPOSICIÓN DE LAS BATERÍAS ION LITIO

Las baterías ion litio (por sus siglas en inglés **Lithium Ion Batteries**, LIB) están compuestas por:

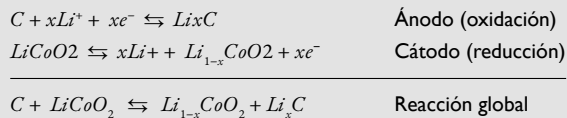
- Un **ánodo**, formado por una lámina de cobre recubierto con grafito en polvo; tiene la función de proporcionar electrones al circuito externo al oxidarse durante la reacción electroquímica.
- Un **cátodo**, consistente en una lámina de aluminio recubierta con óxido mixto de litio y cobalto (u otro metal similar), bajo la forma de LiMO_2 ; este electrodo acepta electrones del circuito externo y en él se produce la reacción de reducción.
- Un **pegamento termorresistente** como el fluoro-polivinildieno (PVDF), que hace que los sólidos de ambos electrodos se adhieran a sus respectivas láminas metálicas.
- Un **electrolito**, que permite la transferencia de la carga dentro de la celda entre ambos electrodos. El tipo de electrolito empleado depende de la marca y/o modelo de la batería; entre los más comunes están LiClO_4 , LiAsF_6 , LiBF_4 y LiPF_6 , siendo este último el más usado.
- Un **film plástico permeable** al electrolito que permite mantener la conductividad iónica y su función es separar los electrodos entre sí.
- Además, las LIB poseen **circuitos metálicos** y, por último, **carcasas**, que son la cobertura externa de los materiales enumerados.

Las baterías ion litio son recargables; es decir, la reacción química que ocurre en ellas puede revertirse un número específico de veces al suministrársele energía eléctrica, haciendo que puedan funcionar un tiempo considerable. El proceso de carga y descarga de una LIB puede resumirse con el siguiente esquema.



Proceso de carga y descarga de una batería ion litio.

Los iones Li^+ migran entre los electrodos hacia el negativo en el proceso de carga y hacia el positivo en el proceso de descarga. Las reacciones químicas que se producen son:



Las LIB disminuyen su rendimiento gradualmente con el tiempo debido a reacciones químicas no deseadas que producen cambios físicos. Estos procesos generalmente no son reversibles y, eventualmente, resultan en una merma en el rendimiento. Entre dichos procesos podemos nombrar: pasivación, corrosión, pérdida

química a través de la evaporación, cambio en la morfología de los productos químicos, celdas en cortocircuito. Hoy es conocido que la vida media útil de estas baterías es de dos años, aproximadamente; por lo cual, es fácil comprender que su disposición final es una cuestión prioritaria.

Alrededor del mundo, hay diferentes legislaciones con respecto a esto:

- En la Unión Europea, se exige al fabricante o importador que se haga cargo de la recolección, tratamiento y valoración de todos los residuos electrónicos y eléctricos (RAEE), incluso en países como Austria, Dinamarca y Alemania, deben hacerse cargo las municipalidades.
- En los Países Bajos existe, desde 1995, una organización (STIBAT) encargada de la recolección y gestión final de las baterías.
- En California se exige que los vendedores de baterías recargables se hagan cargo (sin costo para el consumidor) de su gestión final.
- En otros estados de Estados Unidos y Canadá hay programas nacionales que se encargan de recolectar las baterías y enviarlas a una instalación de reci-

clado (informe gestión pilas y baterías Greenpeace). Los países de MERCOSUR (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay, además de los vecinos países de Chile y Bolivia) consideran a las pilas y/o baterías como residuos especiales de generación universal, es decir que su generación se efectúa en forma masiva o universal, y, por sus consecuencias ambientales, características de peligrosidad, riesgo o potencial efecto nocivo para el ambiente, requieren una gestión adecuada y diferenciada de otros residuos. El Acuerdo de Gestión Ambiental de Residuos Peligrosos y Responsabilidad Post Consumo, fue firmado durante la "IV Reunión Extraordinaria de Ministros de Medioambiente del MERCOSUR". Los países del MERCOSUR se comprometieron a "incorporar patrones de producción y consumo sustentables con el fin de minimizar la cantidad y peligrosidad de los residuos generados". Como sabemos, esto último tiene cumplimiento muy dispar y, a veces, ningún tipo de gestión.

METALES CONTENIDOS EN LAS BATERÍAS ION LITIO AGOTADAS

Los tres metales contenidos en los cátodos de las LIBs (por sus siglas en inglés, spent Lithium Ion Batteries) son: aluminio metálico, cobalto y litio (bajo la forma de LiCoO_2 conocido también como LCO). Entre las aplicaciones de ellos, podemos mencionar:

Aluminio: forma aleaciones utilizadas como material estructural de aviones, automóviles, tanques, buques y bicicletas, en armazones de edificios y en carpintería metálica. El aluminio metálico es muy utilizado en la fabricación de envases para protección, almacenamiento y conservación de alimentos y bebidas. También se emplea en líneas eléctricas ya que, si bien su conductividad es tan solo el 60% de la del cobre, su mayor ligereza disminuye el peso de los conductores y permite una mayor separación de las torres de alta tensión, disminuyendo así los costos en infraestructura.

Cobalto: fabricación de superaleaciones Ni/Co/Fe termorresistentes utilizadas en máquinas y herramientas; aleaciones de multicomponentes llamadas Vitallium (de Co-Cr), las cuales por su elasticidad e inalterabilidad se emplean en prótesis dentales; catalizadores y pigmentos para vidrios, esmaltes, plásticos, cerámicas, pinturas y/o tejidos; imanes (Alnico, Ferrico, Cunico, Cunife) y cintas magnéticas.

Litio: elaboración de lubricantes; de aleaciones con aluminio, cadmio, cobre y manganeso, empleadas en la industria aeronáutica; de vidrios y materiales cerámicos. También se usa en depuradores de aire para naves espaciales y submarinos; en la síntesis de compuestos orgánicos; en desinfectantes y en agentes blanqueadores.

Además, en la industria farmacéutica se emplea en la síntesis de psicofármacos para tratar la depresión y la manía debido a su efecto sobre el sistema nervioso. La principal aplicación hoy en día es en las baterías ion litio.

Además de lo mencionado, a partir de las LIBs puede recuperarse cobre (de las láminas que componen el ánodo), plásticos y grafito.

Como puede advertirse, el proceso de reciclado de baterías ion litio constituye un inapreciable medio para obtener metales y materiales valiosos para numerosas industrias y/o aplicaciones diversas. Esta metodología, denominada Minería Urbana, encuentra cada día más adeptos alrededor del mundo, lo cual constituye un gran avance en el cuidado del ambiente y la protección de los ecosistemas ya que, por un lado, se evitan las explotaciones mineras, cada vez más resentidas en la población global y, por otro, minimiza la acumulación de RAEE que causa contaminación de agua, tierra y aire en todo el planeta.

RECICLADO DE BATERÍAS ION LITIO AGOTADAS

La bibliografía muestra una cantidad importante de trabajos destinados al estudio del reciclado de las LIBs, provenientes de diversos aparatos electrónicos portátiles. Estos trabajos se pueden agrupar según las diferentes vías metalúrgicas utilizadas: hidrometalurgia, pirometalurgia, electrometalurgia y biometalurgia, o combinaciones de ellas.

Sin embargo, hay un proceso que es común a casi todos los mencionados: el **pretratamiento**.

a) Procesos de pretratamiento

Entre los procesos de pretratamiento para la separación del LCO y grafito de las láminas de Al (cátodo) y Cu (ánodo), respectivamente, reportados en la bibliografía, se destacan el raspado mecánico, la disolución del adhesivo (PVDF) que une el sólido a la lámina metálica con N-metil-2-pirrolidona (NMP), pirólisis al vacío, calcinación o directamente por la disolución de la lámina de aluminio y/o cobre por acción de ácidos o álcalis.

En muchos procesos propuestos para el reciclaje de LIBs, el LCO se separa de la lámina de aluminio mediante la lixiviación del cátodo con soluciones diluidas de HNO_3 , H_2SO_4 o NaOH , mediante la cual se disuelve el Al de la lámina usando la propiedad anfótera del aluminio. Nan et al. (2005) propusieron un proceso de extracción del material catódico mediante el cual disolvieron el 98% del Al con solución de NaOH al 10%, 5 h a temperatura ambiente. Cuando se utiliza una solución NaOH para disolver la lámina de aluminio del cátodo, se lixivian

dos sustancias: la capa protectora que recubre la superficie (Al_2O_3) y el aluminio del colector, produciendo tetrahidroxialuminato de sodio.

Las ventajas de este método radican en su sencillez y su alta eficiencia de separación. Sin embargo, la recuperación de Al es difícil debido a la forma iónica de este. Además, las aguas residuales alcalinas (es decir, con la solución NaOH remanente) son muy perjudiciales para el ambiente. Los métodos que utilizan ácidos no solo disuelven el aluminio de la lámina sino también una pequeña parte del LCO.

Este último efecto es más pronunciado a medida que aumenta la concentración del agente químico, aunque se disminuye considerablemente el tiempo de reacción y aumenta la recuperación del LCO.

El adhesivo aglutinante PVDF usado para unir el LCO a la lámina de aluminio es muy difícil de eliminar durante el reciclaje de los componentes de las LIBs debido a su resistencia. En este sentido, el tratamiento ultrasónico con y sin agitación mecánica se considera un método eficaz para sacar el LCO debido a su efecto de cavitación. Li et al. (2012) descubrieron, por un lado, que la mayoría de los materiales catódicos continuaron adhiriéndose a la superficie de los colectores cuando se utilizó solamente agitación mecánica y, por el otro, cuando se usó el ultrasonido solo se separaron partes de estos materiales. Sin embargo, encontraron que, usando ambos métodos en forma conjunta, se podría ejercer mayor presión sobre los materiales insolubles y así todos estos podían ser extraídos de los colectores, en medio acuoso. Otros investigadores reportaron que el efecto de la cavitación (ultrasonido) aumenta la

separación del material catódico debido a la disolución del aglutinante. Los mejores resultados obtenidos, del 99%, fueron alcanzados con NMP, a 70°C, 240 W de potencia y 90 minutos de procesamiento. Además, el material obtenido exhibió un bajo grado de aglomeración, lo que facilitó los procedimientos metalúrgicos posteriores.

Los métodos de tratamiento térmico están basados en la descomposición del aglutinante PVDF debido a la alta temperatura (350°C), de manera de reducir la fuerza de unión entre las partículas del material catódico. Una alternativa a la calcinación tradicional es pirólisis al vacío mediante la cual tanto el aglutinante como el electrolito se evaporan o se descomponen reduciendo la adhesión entre el material activo del cátodo y el colector de energía. La eficiencia en la separación aumenta con el incremento de la temperatura. A 450°C los materiales del cátodo no se despegaban de los colectores, entre 500 y 600°C se logró la mejor separación y por encima de los 600°C la lámina de aluminio se volvió frágil, lo que dificultó la etapa de separación del material catódico del colector. Otros investigadores propusieron un proceso de tratamiento térmico-reductor, el cual modifica las estructuras moleculares de los materiales activos del cátodo, aglutinante y adhesivo para lograr la separación de los colectores de Al lo que facilita la lixiviación de metales en los pasos siguientes de lixiviación.

Las ventajas del tratamiento térmico son su fácil operación y su alto rendimiento en todas sus etapas. Sin embargo, su desventaja es que genera gases venenosos y contaminantes durante el tratamiento térmico por descomposición del aglutinante y los aditivos.

En general, los métodos mecánicos de pretratamiento son efectivos para tratar las LIBs. Estos métodos incluyen tamizado, trituración, separación magnética, entre otros. T. Zhang et al. (2014) encontraron que las LIBs manifestaron excelentes respuestas a la trituración selectiva. Los productos obtenidos se pueden separar en tres partes: una fracción enriquecida en Al (>2 mm), una

fracción enriquecida en Cu y Al (0,25–2 mm) y una fracción enriquecida en Co y grafito (<0,25 mm). Otro proceso para separar los metales de las LIBs combina trituración, tamizado y separación magnética, y se obtuvieron partículas enriquecidas de LiCoO₂ seguido de un proceso hidrometalúrgico para la recuperación de metales.

La principal desventaja de los métodos mecánicos es que los componentes de las LIBs no pueden separarse completamente entre sí. Además, la descomposición de LiPF₆, DEC y PC durante los procesos mecánicos representa un riesgo de contaminación para el ambiente.



Batería recargable de litio desarrollada por Sony.

b) Procesamiento de baterías ion litio

1. Hidrometalurgia

La hidrometalurgia involucra el proceso de transferencia del metal o de los metales de interés presentes en un mineral, un concentrado, un producto intermedio o un desecho, a una forma soluble en agua, seguido de su recuperación, que puede incluir tareas como separación y purificación, para obtener un producto altamente refinado. En ciertos casos, además, la hidrometalurgia es usada para remover residuos fácilmente solubles o ganga, quedando un concentrado insoluble. Esta metodología ofrece muchas opciones atractivas para la recuperación de metales a partir de minerales de bajo grado o complejos, además de residuos electrónicos en donde pueden estar en bajas concentraciones, pero igualmente aprovechables.

La hidrometalurgia aplicada al reciclado de baterías ion litio persigue, en general, la disolución del LCO y posterior recuperación de los metales como compuestos medianamente puros, mediante la utilización de ácidos inorgánicos y orgánicos.

Ácido inorgánicos

El ácido inorgánico más utilizado en las investigaciones realizadas es el sulfúrico. Su efecto sobre la disolución ha sido estudiado con y sin la presencia de un agente reductor. Como agentes reductores se han empleado H_2O_2 y $Na_2S_2O_3$. Las disoluciones en presencia de estos agentes reductores están entre 70 y 99,9% para el Co y entre 70 y 99,5% para el Li, dependiendo del tratamiento previo al que fue sometida la muestra.

Los estudios realizados empleando H_2SO_4 incluyen el análisis de la cinética de la reacción de disolución.

De este modo, Nayl et al. (2017) estudiaron la cinética de lixiviación de Li, Co, Mn y Ni presentes en la muestra y, a partir de sus resultados experimentales, propusieron que la disolución de todos los metales está controlada por la reacción química. De manera diferente Jha et al. (2013) proponen, en condiciones similares de trabajo, que la reacción de disolución está regida por un control químico para el Li y un control físico para el Co. Meshram et al. (2015a, 2015b) han estudiado la reacción de disolución de materiales catódicos mezclados del tipo $LiCoO_2$, $Li_2CoMn_3O_8$ y NiO_2 con ácido sulfúrico, en diferentes medios reductores, reportando que para temperaturas en un rango de 100-400°C los ΔG° del Li y Co son menores, lo que indicaría que es más probable que se lixivien Li y Co; además, proponen que el control de la reacción de disolución de los diferentes metales contenidos es difusional.

El estudio de la recuperación de Li y Co de la solución lixiviada con H_2SO_4 - H_2O_2 mediante precipitación química se realizó con diferentes agentes. Para Co, se estudiaron $(\text{NH}_2)_4\text{C}_2\text{O}_2$ y NaOH mientras que para Li se analizó solo el Na_2CO_3 .

Otro agente estudiado es el ácido nítrico; por ejemplo Lee & Rhee, (2002) investigaron el efecto de las variables operativas del proceso en medio reductor, obteniendo, en las mejores condiciones, valores de disolución del 85% tanto para el Co como para el Li. Además, volvieron a sintetizar el LiCoO_2 a partir de los lixiviados mediante el método de sol gel, empleando como agente precursor ácido cítrico y así obtuvieron un óxido con buenas características para ser usado como material activo para cátodos, con una capacidad de carga y descarga de 165 y 154 m Ah/g, respectivamente. Grasso et al. (2016) estudiaron la lixiviación de los cátodos de la LIBs con ácido nítrico. Sus resultados indican que el ácido nítrico es un buen agente lixivante, obteniéndose disoluciones del cátodo cercanas al 50% al trabajar a 330 rpm, 0,8% p/v de relación sólido líquido, 75°C, durante 60 minutos y con HNO_3 al 15% v/v.

Suárez et al. (2017) analizaron los pa-

rámetros operativos que influyen en la disolución del LiCoO_2 en HF y la posterior síntesis de Co_3O_4 y LiF. Ellos obtuvieron una recuperación de Co como Co_3O_4 y Li como LiF, del 98% y del 80%, respectivamente, con una pureza mayor al 94%. Además, lograron la eliminación de todo el HF remanente por la adición de CaCO_3 . En otro trabajo Pinna et al. (2019) estudiaron los aspectos termodinámicos y los parámetros operativos de la reacción de disolución del LCO con HF y HF- H_2O_2 encontrando que la extracción de Li y Co aumenta considerablemente cuando la lixiviación del LCO se realiza en presencia de un agente reductor, además, disminuye diez veces la concentración de HF y acorta a la mitad el tiempo de reacción.

En la bibliografía también se encontraron trabajos en los cuales se empleaba HCl para la disolución del LiCoO_2 . Este ácido posee la particularidad de que, además de disolver la muestra, produce una reacción de óxido reducción que involucra al anión cloruro que genera Cl_2 , por lo cual no precisa de la adición de un agente reductor, como es el caso de la mayoría de los otros ácidos, para obtener buenos valores de disolución. Con el HCl se ob-

tuvieron disoluciones de Li y Co cercanas al 100% para ambos metales. Suárez et al. (2014) estudiaron la cinética de reacción para la disolución del LiCoO_2 con HCl mediante el *software* Modelado®, encontrando que dicha disolución ocurre mediante “nucleación y crecimiento de los núcleos”, que el incremento en la temperatura y en el tiempo favorecen la reacción y que ella está controlada químicamente. Drailin et al. (2018) reportaron un estudio comparativo de la disolución de LiCoO_2 con HCl, con y sin presencia de agente reductor (H_2O_2). Ellos concluyeron que el uso de reductor disminuye a la mitad el tiempo de reacción y en más de diez veces la cantidad de agente lixivante necesario para lograr la disolución, con muy buenos resultados (93% de disolución de la muestra). Pinna et al. (2017) analizaron la disolución del LiCoO_2 con H_3PO_4 y la posterior recuperación de compuesto de Li y Co. Ellos concluyeron que el ácido fosfórico funciona mejor como disolvente, junto con un agente reductor, como es H_2O_2 , consiguiendo una disolución de, aproximadamente, el 99% de la muestra. Además, lograron la recuperación del

Li como Li_3PO_4 (98,3%) y del Co como CoC_2O_4). En otro trabajo, Pinna et al. (2020) analizaron el comportamiento cinético de la disolución del LCO obtenido de LIBs y comercial, utilizando ácido fosfórico como agente lixivante. En ambos casos dedujeron que la reacción de disolución muestra un control de tipo químico y la cinética de la reacción es de segundo orden.

Con respecto a la recuperación del Li y Co desde los lixiviados provenientes del tratamiento con HCl, se ha estudiado la vía de la precipitación química para Co mediante NaOH, obteniendo valores de recuperación iguales o superiores al 85% y, para Li, con Na_2CO_3 , reportando recuperaciones del 80%. Suárez et al. (2013) realizaron un estudio integral de la disolución del óxido mixto empleando diversos agentes lixivantes, tales como HCl, H_2SO_4 y HF; y de la recuperación de compuestos de Li y Co a partir de los lixiviados utilizando NaOH, EDTA, NH_4OH , ácidos orgánicos y CO_2 . Los resultados mostraron que el mejor agente disolvente fue el HCl y el mejor reactivo precipitante, el NaOH.

Trabajos consultados, con respecto al tratamiento de LIBs con ácidos inorgánicos.

Referencia	Estudio	Agentes	Muestra	Procedimiento experimental	Observaciones
Zhu et al., (2012)	Lixiviación y precipitación de Li y Co.	H_2SO_4/H_2O_2 , $(NH_4)_2C_2O_4$ y Na_2CO_3	LiCoO ₂	No especifica tratamiento previo de la muestra. Condiciones de lixiviación: $[H_2O_2]$ (2 M), T (60°C), t (180 min), R S/L (33 g/L) y VA (300-400 rpm). Variables de disolución: $[H^+]$ (0,5-2M) y potencia ultrasonido. Variables de precipitación: Co= T (20-60°C) y pH (1-5). Li (20 g/L) = T (20-60°C) y pH (4-12).	Lixiviación: Co 96% y Li 87%. Recuperación: Co 95% y Li 71%. Reporta pureza del oxalato de cobalto del 95%.
Nayl et al., (2017)	Lixiviación, cinética de la reacción y recuperación de metales.	NH_4OH H_2SO_4/H_2O_2 , Na_2CO_3 $NaOH$	Ánodo y cátodo	Disolución de Al y Cu con NH_4OH , 4 M a 60°C, durante 60 min. Disolución de los demás metales, variables: t (15- 180min), R S/L (2-20 g/L) y T (20-100°C). Cinética, variables: t (15-120 min) y T (20-70°C). Precipitación Mn, Ni y Li con Na_2CO_3 y Co con $NaOH$.	Propone ecuación de disolución. Disolución: 99% Li y Co. Recuperación (%): Li 90, Mn 94, Ni 91 y Co 95. Propone control químico, Ea entre 30 y 41 kJ/mol para los cuatro metales.
Kang et al., (2010)	Lixiviación reductora y extracción de los metales mediante solventes.	$H_2SO_4-H_2O_2$, Cyanex 242	LiCoO ₂	Lixiviación, variables: tamaño de partícula (8- 16 mesh), R S/L (50-100 g/L), T (60-85°C), $[H^+]$ (1-2 M) y $[H_2O_2]$ (0-20% vol). Extracción con solventes variables: [Cyanex] (0,03-0,54) y pH (4,5 - 7).	Propone ecuación de extracción. Disolución: Co 98 y Li 97%. Extracción Co 95-98%.
Shin et al., (2005)	Lixiviación reductora y efecto de la incineración de la muestra.	$H_2SO_4-H_2O_2$	Cátodo triturado	Trituración. Separación mecánica del Al por tamizado. Disolución, variables: $[H_2O_2]$ (0-20%), t (0-60min), tamaño de partícula (106-850 μm). Efecto de la incineración a 900°C.	Disolución para Li y Co cercana al 100%. Incineración: no afecta la disolución de Li pero sí la de Co con un incremento de alrededor del 40%.

J. Wang et al., (2012)	Lixiviación reductora.	H_2SO_4 - $Na_2S_2O_3$	Cátodo Li 3,70% Co 35,30%	Descarga con NaCl. Reducción de tamaño. Disolución alcalina a 80°C durante 24 h para la separación del Al. Disolución ácida variables: [H ⁺] (1-4 M), R S/L (6-20 g/L), t (0,5-3 h), T (70-100°C) y [Na ₂ S ₂ O ₃] (0-0,3 M).	Disolución: Co y Li cercanos al 100%. El Na ₂ S ₂ O ₃ es un buen agente reductor.
Jha et al., (2013)	Lixiviación y cinética.	H_2SO_4 - H_2O_2	LiCoO ₂ 74 μm Co 23,67% Li 2,87% Ni 0,26%	Desmantelado. Triturado. Tamizado. Disolución variables: t (0-80 min), [H ⁺] (1- 3M), R S/L (20-200g/L), T (50-80°C) y [H ₂ O ₂] (0-10% v/v).	Disolución: 99% Li y 70% Co. Propone control químico para Li y físico para Co, Ea 32,4 (Li) y 59,8 kJ/mol (Co).
Mantuano et al., (2006)	Lixiviación y extracción con solventes.	H_2SO_4 - H_2O_2 , Cyanex 242	Mezcla de baterías Ni-Cd, NiMH y ion litio	Desmantelado manual y separación de partes secadas durante 24 h a 60°C. Molienda 30 min (10-500 μm). Disolución variables: [H ⁺] (2-8% v/v), R S/L (1-10,1-50 g/mL), T (50-80°C) y [H ₂ O ₂] (0,2-4% v/v). Extracción con solventes a 50°C durante 20 min.	Extracciones superiores al 90% para todos los metales presentes.
Dorella & Mansur, (2007)	Lixiviación, extracción con solventes y precipitación.	H_2SO_4 - H_2O_2 , Cyanex 242, NH ₄ OH	Ánodo y cátodo	Desmantelado manual. Separación de partes. Secado durante 24 h a 60°C. Molienda 30 min. Disolución, variables: [H ⁺] (2-8%v/v), R S/L (1-10,1-50 g/mL), T (50-80°C) y [H ₂ O ₂] (0,2-4%v/v). Extracción con solvente a 50°C, 420 rpm durante 20 min.	Disolución: 55 Al, 80 Co y 95% Li. Extracción: 85% del Co extraído. Precipitación del Al con NH ₄ OH.

Swain et al., (2007)	Lixiviación, extracción con solventes y precipitación del Co y Li.	$H_2SO_4-H_2O_2$, Cyanex 242, Na_2CO_3	$LiCoO_2$ 83 μm Li 7,09% Co 60%	No se especifica tratamiento previo de la muestra. Disolución, variables: $[H^+]$ (0-4M), R S/L (10- 125 g/L), T (15-90°C) y $[H_2O_2]$ (0-25 volúmenes). Extracción con solvente pH (4-5) y [Cyanex] (0,5-2 M).	Disolución: Co y Li 99%. Extracción: 85,42% del Co. Precipitación: Li_2CO_3 no reporta pureza y $CoSO_4$ 99,9% de pureza.
Meshram et al., (2015a)	Lixiviación y cinética.	H_2SO_4 - $NaHSO_3$	$LiCoO_2$ Li_2CoMn_8	Desmantelado manual. Separación de partes. Secado durante 24 h a 60°C. Disolución, variables: $[H^+]$ (1 M), R S/L (20 g/L), T (368 K) y $[NaHSO_3]$ (0,075 M).	Disolución: Mn: 87, Li: 96, Co: 91 y Ni: 96%. Ea: Li:20,4, Co: 26,8 y Ni: 21,7 kJ/mol. Plantea control difusional.
Meshram et al., (2015b)	Lixiviación y cinética.	H_2SO_4	$LiCoO_2$ $Li_2CoMn_3 O_8$	Desmantelado manual. Separación de partes. Secado durante 24 h a 60°C. Disolución variables: $[H^+]$ (1M), R S/L (50 g/L), t (240 min) y T (368 K).	Disolución: Mn: 50%, Li: 93%, Co: 66% y Ni: 96%. Ea: Li:16, Co:7 y Mn: 18 kJ/mol. Plantea control difusional.
Nan et al., (2006)	Lixiviación y extracción con solventes.	$NaOH$, H_2SO_4 - H_2O_2 Cyanex 272 Acorga M5660	Batería ion litio y NiMH	Desmantelado manual y separación de las partes para calcinar los electrodos a 580-630°C durante 5 h. Disolución solo estudio tiempo de reacción. Extracción con solvente pH 0,4-1,6.	Disoluciones superiores al 94%.
Chen et al., (2011)	Lixiviación alcalina y ácida, extracción con solventes y precipitación. Estudia TG y DSC.	$NaOH$ H_2SO_4 - H_2O_2 , Cyanex 272, P507, $(NH_4)_2C_2O_2$	Ánodo y cátodo Li 3,34% Co 26,77% Al 5,95%	Desmantelado manual y separación de partes. Trituración del ánodo, cátodo y film cortados 1-5 mm. Calcinción 2-3 h a 150-200°C y molienda 10-500 μm . Disolución alcalina del Al durante 4 h a 25°C. Calcinción a 700- 800°C. Disolución ácida variables: $[H^+]$ (0,5-12 M), R S/L (1-10,1-50 g/mL), T (50-80°C) y $[H_2O_2]$ (0,2-4% v/v).	Disolución: Co 95%, Li 96%. Recuperación: Co 98%. Pureza 99%.

Lee & Rhee, (2002)	Lixiviación y síntesis de LiCoO_2 .	HNO_3 - H_2O_2 , ácido cítrico	LiCoO_2	Desmantelado y separación de las partes. Calcinación del óxido a 500-900°C, durante 0,5-2 h. Disolución, variables: $[\text{H}^+]$ (0,1-1M), R S/L (5- 40 g/mL), T (25-90°C), $[\text{H}_2\text{O}_2]$ (0-3,5% v/v), t (0-120 min). Síntesis emplea lixiviados y ácido cítrico como precursor.	Disolución: Co 40-85% y Li 75-85%.
Takacova et al., (2016)	Termodinámica y cinética de la disolución.	HCl y H_2SO_4	LiCoO_2 Co_3O_4 $\text{Li}_{0,45}\text{Ni}_{1,05}\text{O}_2$.	Separación mecánica de partes. Cortado y lavado ultrasónico de ánodo y cátodo. Separación polvo. Condiciones: T 80°C, t 90 min y $[\text{H}^+]$ 2 M.	Ea: Etapa I y II HCl: Co:40 y 20, Li:17 y 9 kJ/mol Etapa I y II H_2SO_4 : Co:43 y 3, Li:16 y 6 kJ/mol.
Jinhui Li et al., (2009)	Lixiviación y precipitación del Co.	HCl, NaOH	Ánodo y cátodo	Separación mecánica de partes. Cortado y lavado ultrasónico de ánodo y cátodo. Separación polvo. Disolución, variables: $[\text{H}^+]$ (1-5 M), T (40- 100°C) y t (30- 180 min). Precipitación con NaOH.	Disolución: Co 99% y Li 97%. Recuperación 89% de Co.
Contestabile et al., (2001)	Lixiviación y precipitación del Co.	HCl, NaOH	LiCoO_2	Separación mecánica de partes. Cortado y lavado ultrasónico de cátodo con NMP a 100°C durante 1 h. Separación polvo. Disolución: $[\text{H}^+]$ 4M, T 80°C, durante 60 min. Precipitación de Co con NaOH 4 M.	No reporta valores de disolución ni de recuperación.
R.-C. Wang et al., (2009)	Lixiviación y precipitación del Li y Co.	HCl, NaOH, Na_2CO_3	LiCoO_2	No especifica tratamiento previo. Disolución, variables: $[\text{H}^+]$ (2-6 M), R S/L (0,02-0,1g/mL), T (60-80°C) y t 30-240 min).	Disolución (%): 99,9 Co y 99,5 Li. Recuperación (%): 95 Co y 80 Li.

Zhang et al., (1998)	Lixiviación.	HCl, H ₂ SO ₃ , NH ₂ OHCl	Cátodos baterías cilíndricas Sony	No especifica tratamiento previo. Disolución, variables: [H ⁺] (1-6 M), T (25-80°C) y t (2,5-30 min).	Disolución (%): 99 Co y Li.
Pinna et al., (2020)	Modelado cinético de la disolución de LiCoO ₂ .	H ₃ PO ₄ -H ₂ O ₂	LiCoO ₂ de LIBs y comercial	No especifica tratamiento previo. Disolución, variables: [H ⁺] (2% v/v), T (298- 348 K) y t (0,5-120 min)	Plantea un control de reacción de tipo químico y una cinética de segundo orden.
Suárez et al., (2014)	Estudio cinético de la lixiviación del LiCoO ₂ .	HCl	LiCoO ₂ de LIBs	No especifica tratamiento previo. Disolución, variables: [H ⁺] (5% v/v), T (25-75°C) y t (0-120 min)	Plantea un control de reacción de tipo químico.
Drailin et al., (2018)	Lixiviación del LiCoO ₂ .	HCl y HCl- H ₂ O ₂	LiCoO ₂ de LIBs	No especifica tratamiento previo. Disolución, variables: [H ⁺] (15% v/v); [H ⁺]-[H ₂ O ₂] (2 y 5% v/v), respectivamente; T (25-75°C) y t (30-120 min.).	El uso del agente reductor disminuye a la mitad el tiempo de reacción y en 10 veces la [HCl], para obtener disoluciones similares.
Grasso et al., (2016)	Estudio cinético de la lixiviación del LiCoO ₂ .	HNO ₃	LiCoO ₂ de LIBs	No especifica tratamiento previo. Disolución, variables: [H ⁺] (5% v/v), T (30-70°C) y t (1-90 min)	Plantea un control de reacción de tipo mixto para Li (Ea=6,5 kcal/mol) y difusional a químico para Co (Ea=0,23 y 23,56 kcal/mol).



Ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos generalmente requieren de un agente reductor para lograr obtener buenos valores de disolución.

Li Li et al. (2012) postulan que esto se debe a que agentes reductores como el peróxido de hidrógeno o el ácido ascórbico actúan reduciendo el Co (III) a Co (II), lo cual facilita su salida de la estructura del LiCoO_2 agilizando la salida del litio al modificarse la estructura.

El ácido orgánico más estudiado como agente lixivante, según la bibliografía consultada, es el ácido cítrico en medio reductor; con él se obtienen porcentajes de disolución de alrededor del 100% para Li y Co.

Por otro lado, Zeng et al. (2015) estudiaron la cinética de la reacción de disolución de LiCoO_2 , provenientes de LIBs y de una muestra comercial estándar de dicho compuesto puro, con ácido oxálico y reportan la disolución total de las mismas y la generación de CoC_2O_4 como producto, en ausencia de un agente reductor. Además, a partir de los datos experimentales, concluyeron que el control de la reacción es químico, independientemente de la muestra empleada. Además, destacaron que el LiCoO_2 estándar reaccionó con mayor facilidad de acuerdo a los valores de las constantes de velocidad de reacción reportados, ($0,067 \text{ s}^{-1}$) para la muestra estándar y ($0,034 \text{ s}^{-1}$) para la muestra proveniente de las LIBs.

Otra investigación referida a la cinética de la reacción entre LiCoO_2 y un ácido orgánico fue realizada por Li Li et al. (2018). Ellos emplearon ácido succínico en medio reductor para disolver la muestra y obtuvieron valores de disolución

cercanos al 100% para Li y del 90% para Co. A partir del análisis cinético propusieron que entre 0 y 10 min el control de la reacción era de tipo químico, mientras que al incrementar el tiempo entre 20 y 40 min, el control era de tipo difusional. Pinna et al. (2014) estudiaron la extracción de Li y Co desde el óxido mixto con la mezcla ácido tartárico-peróxido de hidrógeno. Ellos reportaron valores cercanos al 60% de disolución de la muestra. Barufaldi et al. (2018) emplearon glucosa como agente reductor, usando también $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ como lixivante, obteniendo una disolución del 72% de la muestra. Golmohammadzadeh et al. (2017) plantearon que la lixiviación del litio desde LiCoO_2 empleando un ácido orgánico como el cítrico depende de la cantidad de H^+ disponibles en la solución, a diferencia del cobalto que, además, depende del tipo de anión producido por la disociación del ácido seleccionado, lo cual ocurre debido a la formación de quelatos entre los iones cobalto y los aniones del ácido seleccionado cuando se disocia. Además, explican que la lixiviación de la estructura del óxido mixto del tipo LiCoO_2 (LCO) es más difícil que las del tipo LiMnO_2 (LMO) y $\text{LiNi}_{0,3}\text{Co}_{0,3}\text{Mn}_{0,3}\text{O}_2$ (NCM). En la primera estructura, la lixiviación de Co es lenta, lo que está relacionado con la conversión de Co^{3+} en Co^{2+} . Para las segundas estructuras, en la LMO la lixiviación del Li también es lenta debido a su interacción con los metales de transición, mientras que la disolución del Mn se acelera debido al efecto Jahn-Teller; en la estructura NCM, el Ni está presente en estado divalente, por lo que se lixivía fácilmente sin la reacción de reducción.

Trabajos consultados, con respecto al tratamiento de LIBs con ácidos orgánicos.

Referencia	Estudio	Agentes	Muestra	Procedimiento experimental	Observaciones
L. Li et al., (2012)	Lixiviación y TGA/DSC.	Ácido ascórbico/ H_2O_2	$LiCoO_2$	Lavado ultrasónico con NMP. Calcinción a 450°C, 1 h y 30 min de molienda. Variables: T (30- 90°C), t (5-50 min), R S/L (15-50 g/L), VA (300 rpm) y $[H^+]$ (0,3-15 M).	No reporta composición inicial de la muestra. Disolución: Li 98,5 y Co 94,8%.
Li Li et al., (2010)	Lixiviación.	Ácido Dmálico/ H_2O_2	$LiCoO_2$ / Co_2O_3 < 106 μm Li, 4,4% Co, 53,8%	Lavado ultrasónico con NMP. Calcinción a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Variables: T (20- 90°C), t (10-50 min), R S/L (16-33 g/L), VA (300 rpm), $[H^+]$ (0,3-3 M) y $[H_2O_2]$ (0-2,5% v/v).	Propone ecuación de disolución. Disolución: ~100% para Li y ~90% para Co.
Li Li et al., (2018)	Lixiviación.	Ácido cítrico/ H_2O_2	$LiCoO_2/Co_2O_3$ Li, 4,4% Co, 53,8% Mn, 0,97% Ni, 0,8%	Lavado ultrasónico con NMP. Secado 60°C durante 24 h. Calcinción a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Variables: T (30- 90°C), t (10-60 min), R S/L (10-40 g/L), VA (300 rpm), $[H^+]$ (0,3-1,5 M) y $[H_2O_2]$ (0-1,5% v/v).	Propone ecuación de disolución. Disolución: ~100% para Li y ~90% para Co.
Li Li et al., (2013)	Lixiviación y análisis medioambiental.	Ácido cítrico, málico y aspártico con H_2O_2	$LiCoO_2/Co_2O_3$ / Al	Cortado de cátodo y lavado ultrasónico con NMP a 100°C y 1 h. Calcinción a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Variables: T (25- 90°C), t (15-150 min), R S/L (5-30 g/L), VA (300 rpm), $[H^+]$ (0,5-2 M) y $[H_2O_2]$ (0-6% v/v).	El ácido menos eficiente es el aspártico. No reporta composición inicial de la muestra, da porcentajes de componentes de la batería. Disolución: ~100% de Li y ~90% de Co para los ácidos cítrico y málico.

Li Li et al., (2014)	Disolución asistida por ultrasonido.	Ácido cítrico y sulfúrico con H_2O_2 y HCl	$LiCoO_2/Co_2O_3$	Cortado de cátodo y lavado ultrasónico con NMP a 100°C durante 1 h. Filtrado y lavado durante 24 h a 120°C. Calcinación a 700°C, 3 h y 2 h de molienda. Variables: T (20- 60°C), t (2-6 h), R S/L (25 g/L), VA (300 rpm), $[H^+]$ (0,5-2 M), $[H_2O_2]$ (0-6%v/v) y Potencia (60 -120 W).	Disolución de Co: 46% (H_2SO_4/H_2O_2), 76% (HCl) y 96% (H_2O_2), (ácido cítrico/ H_2O_2), Disolución de Li: 97% (H_2SO_4/H_2O_2), 98% (HCl y ácido cítrico/ H_2O_2).
Li Li et al., (2015)	Estudio de la disolución y la cinética.	Ácido succínico/ H_2O_2	$LiCoO_2/Co_2O_3$ Li 6,76% Co 57,94% Mn 0,91% Ni 0,76%	Cortado de cátodo y lavado ultrasónico con NMP a 100°C durante 1 h. Calcinación a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Variables: T (25- 90°C), t (15-150 min), R S/L (5-30g/L), VA (300 rpm), $[H^+]$ (0,25-2 M), y $[H_2O_2]$ (0-6% v/v).	Propone reacción de disolución y ecuación de velocidad. Disolución: ~100% de Li y ~90% de Co.
Li Li et al., (2018)	Estudio de la disolución y su cinética. Resíntesis del óxido mixto y estudio electroquímico.	Ácido cítrico/ H_2O_2	$LiCoO_2$	Cortado de cátodo y lixiviación alcalina para separar aluminio. Filtrado. Calcinación del material activo a 700°C, 5 y 2 h de molienda. Variables: T (30- 90°C), t (15-75 min), R S/L (10-50 g/L), $[H^+]$ (0,25-2 M), y $[H_2O_2]$ (0-3% v/v).	Plantea un control de reacción de tipo químico. Disolución: ~100% de Li, Mn, Co y Ni. Ea: Mn:45, Li:66, Co: 86, Ni:49 kJ/mol.
Sun & Qiu, (2012)	Pirólisis al vacío. Lixiviación y precipitación del Co.	Ácido oxálico/ H_2O_2	$LiCoO_2-CoO$	Pirólisis al vacío durante 30 min a 600°C y 1 kPa. Variables: T (40- 90°C), t (30-180 min), R S/L (10-90 g/L), VA (300 rpm), $[H^+]$ (0,5-2 M) y $[H_2O_2]$ (0-20% v/v).	La eficiencia de la lixiviación es del 98%, la adición de H_2O_2 no mejora la eficiencia. Disuelven el resto de $LiCoO_2$ de la lixiviación con agua regia.
Zeng et al., (2015)	Lixiviación y precipitación de Li y Co. Estudio cinético y optimización del sistema.	Ácido oxálico	$LiCoO_2$ <1,43mm Li, 3,52 Co, 24,53 Cu 2,45 Al, 0,83 Fe, 0,25	Variables: T (75- 95°C), t (60-180 min), R S/L (15-45 g/L), VA (300-400 rpm) y $[H^+]$ (0,5-2M).	Propone ecuación de disolución y precipitación. Disolución: 98% de Li y 97% de Co.
Nayaka et al., (2015)	Lixiviación y precipitación de Li y Co.	Ácido cítrico/ ácido ascórbico	$LiCoO_2$	Calcinación a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Lixiviación durante 6 h a 80°C, precipitación oxalato de cobalto y fluoruro de litio.	No reporta composición inicial de la muestra. El ácido cítrico actúa como agente quelante y el ácido ascórbico actúa como agente reductor.

Nayaka et al., (2016a)	Lixiviación y precipitación del Co.	Glicina y ácido ascórbico	LiCoO ₂	Cortado de cátodo y lavado ultrasónico con NMP a 100°C, 1 h. Calcinación a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Lixiviación durante 6 h a 80°C glicina 0,5 M y ácido ascórbico 0,02 M, precipitación oxalato de cobalto.	No reporta composición inicial de la muestra. La glicina actúa como agente quelante y el ácido ascórbico actúa como agente reductor.
Nayaka et al., (2016b)	Lixiviación y precipitación de Li y Co.	Ácido iminodiacético y málico/ Ácido ascórbico	LiCoO ₂	Lixiviación durante 6 h a 80°C, [H ⁺] 1 M y [ácido ascórbico] 0,02 M. Precipitación oxalato de cobalto y fluoruro de litio.	No reporta composición inicial de la muestra. Disolución: 100% de Li y 97% de Co, con ácido maleico y, 99% de Li y 91% de Co, con ácido iminodiacético.
Golmohammadzadeh et al., (2017)	Lixiviación estudio cinético y optimización del sistema.	Ácido málico, cítrico, oxálico y acético/ H ₂ O ₂	LiCoO ₂ / Co ₃ O ₄	Calcinación a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Variables: T (60°C), R S/L 30 g/L, t (120 min), [H ₂ O ₂] 1,2% v/v y [H ⁺] (2 M).	No reporta valores de Ea pero postula que el control de la reacción es de tipo difusional. Disolución: 92% de Li y 81% de Co.
Zhang et al., (2015)	Estudio de la disolución y la cinética.	Ácido tricloroacético/ H ₂ O ₂	LiCo _{1/3} Mn _{1/3} Ni _{1/3} O ₂	Calcinación a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Variables: T (60°C), t (30 min), [H ₂ O ₂] 4% v/v y [H ⁺] (3 M).	Ea: Mn:43, Li:28, Co:44, Ni:44 kJ/mol Plantea un control de reacción de tipo químico. Disolución: 89% de Mn, 99% de Li, 91% de Co y 93% de Ni.
Zhang et al., (2014)	Estudio de la disolución y la síntesis del óxido.	Ácido tricloroacético/ H ₂ O ₂	LiCo _{1/3} Mn _{1/3} Ni _{1/3} O ₂	Calcinación a 700°C, 5 h y 2 h de molienda. Variables: T (60°C), t (30 min), [H ₂ O ₂] 4%v/v y [H ⁺] (3 M).	Disolución: 89% de Mn, 99% de Li, 91% de Co y 93% de Ni.
Pinna et al., (2014)	Extracción de Li y Co.	C ₄ H ₆ O ₆ - H ₂ O ₂	LiCoO ₂ de LIBs	Calcinación a 400°C, 3 h. Variables: T (15-90°C); t (0-300 min); [H ₂ O ₂] (0-10% v/v); [H ⁺] (1-15% v/v); R-S/L: (0,2-2% p/v)	Condiciones óptimas de extracción, 60%, a: 75°C, 330 rpm, 20 min, R-S/L 0,8% p/v [C ₄ H ₆ O ₆] 5% v/v y [H ₂ O ₂] 2% v/v.
Barufaldi et al., (2018)	Metodología de superficie de respuesta aplicada a la extracción de Li y Co desde LiBs.	C ₄ H ₆ O ₆ - C ₆ H ₁₂ O ₆	LiCoO ₂ de LIBs	Calcinación a 400°C, 3 h. Variables: T (25-80°C), t (30-120 min), [H ₂ O ₂] 4% v/v y [H ⁺] (0,3-0,6M); C ₄ H ₆ O ₆ (0-0,06 M).	Condiciones óptimas de disolución, 72%, Método multivariable: T, 80°C; relación R- S/L= 8 g/L; t, 100 min; 300 rpm; C ₄ H ₆ O ₆ =0,5 M y C ₆ H ₁₂ O ₆ =0,03 M.

2. Pirometalurgia

La pirometalurgia es la metodología más antigua utilizada por el hombre para la recuperación de metales desde minerales y para la purificación de dichos metales. Generalmente, estos procesos utilizan altas temperaturas consumiendo gran cantidad de energía.

Actualmente, el uso de la pirometalurgia está destinado a los procesos de extracción de metales a partir de minerales. Esto podría deberse a: altas velocidades de reacción; temperaturas moderadas de trabajo; variedad y disponibilidad de agentes químicos; propiedades físicas y químicas favorables para la efectividad de estos procesos; alta solubilidad de muchos compuestos generados; variedad de estados de oxidación y facilidad para separarlos.

Un proceso pirometalúrgico típico utilizado para reciclar metales valiosos de LIBs se fundamenta en la función reductora de la alta temperatura. En este proceso, las LIBs se colocan directamente en un horno de fundición, sin realizarles ningún tratamiento previo. Los plásticos, solventes orgánicos y grafito presentes en las baterías proporcionan calor durante la combustión, mientras que los componentes metálicos se reducen y forman una aleación. Luego, las aleaciones obtenidas se trituran y se disuelven generalmente con ácido sulfúrico (H_2SO_4). La etapa de recuperación se realiza mediante la extracción con disolvente para obtener los óxidos de cobalto y el hidróxido de níquel ($Ni(OH)_2$). Aunque, como se mencionó, este proceso no requiere

tratamiento previo, resulta en la pérdida casi total de Li. Una alternativa a él, para minimizar la pérdida de Li, es el reportado por Georgi-Maschler et al. (2012); en este método de fundición/reducción el contenido metálico es convertido en una aleación, incluidos Fe, Co, Ni y Mn, en la cual el litio forma parte de la escoria o del polvo y luego, se lixivía con H_2SO_4 . Otro proceso propuesto extrae el Li de las LIBs mediante evaporación selectiva al vacío usando un gas portador inerte. Este método se realiza a altas temperaturas ($>1.400^\circ C$), lo cual demanda un alto consumo de energía. Jia Li et al. (2016) calcinaron $LiCoO_2$ y grafito a $1.000^\circ C$ durante 30 minutos bajo atmósfera de nitrógeno, obteniéndose carbonato de litio, carbono y Co; estos productos se disolvieron en agua y se separaron magnéticamente.



Foto: iStock.

Horno de fundición de metales utilizado en procesos pirometalúrgicos.

Si bien la concentración de litio en el lixiviado fue de 337,4 mg/L; es necesario concentrarla por evaporación para su solidificación (Li_2CO_3). Una alternativa al método anterior fue propuesta por Hu et al. (2017), en el cual trabajaron a 650°C, 3 h en atmósfera de argón y 19% en carbono. Los productos obtenidos fueron Li_2CO_3 , Ni, Co y óxido de manganeso (II) (MnO). Posteriormente, estos productos se disolvieron en agua y se carbonataron con CO_2 para pasar el Li_2CO_3 insoluble a LiHCO_3 . Luego, recuperaron el Li_2CO_3 sólido por un proceso de cristalización/ evaporación.

Aunque reciclar los metales valiosos de LIBs a través de pirometalurgia es simple, estos procesos no son ecológicos debido a su alto consumo de energía y contaminación secundaria. Además, la pérdida de Li durante el proceso de reciclaje dificulta su aplicación a escala industrial. En la bibliografía se encuentran publicadas varias patentes sobre los procesos utilizados para la recuperación de metales valiosos contenidos en las LIBs, algunas han sido diseñadas específicamente con este fin y otras fueron adaptadas para ello. Entre las más importantes podemos mencionar:

El proceso TOXCO, diseñado para cualquier residuo peligroso que contenga litio; en este proceso el residuo se enfría en nitrógeno líquido a -185°C aproximadamente, luego se tritura mecánicamente y se mezcla con agua para producir hidróxido de litio. Varias industrias tales como TOXCO Inc., Estados Unidos; BDC Inc., Canadá; Sony Corp., Japón; SNAM, Francia; Umicore, Bélgica, y tecnología AEA, Reino Unido, reciclan LIBs u otras

baterías, aunque la recuperación de litio es muy baja. Como se informa en la literatura, debido a la alta reactividad del litio en el aire o la humedad, las LIBs son procesadas industrialmente por TOXCO Inc. y BDC Inc., utilizando plantas de reciclaje de procesos a baja temperatura solo en Canadá y Estados Unidos. El proceso TOXCO puede reciclar la mayoría de los tipos y tamaños de las baterías desechadas, incluyendo las baterías alcalinas, de iones de litio, mercurio, NiCd, plomo.

En el caso particular del procesamiento de las LIBs mediante este proceso, el material se somete a trituración criogénica. Luego de triturar los materiales, se separan algunas partes de los mismos por tamizado. El material en polvo se mezcla con agua, donde el litio se disuelve como hidróxido de litio y produce hidrógeno, que se quema por encima del líquido de reacción. Mediante este proceso, el producto principal es el hidróxido de litio, seguido de cobalto, níquel u otros metales.

Las LIBs que se reprocesan en Francia (SNAM) o en el Reino Unido (baterías con tecnología AEA) tienen principalmente el objetivo de recuperar electrolitos y metales valiosos del ánodo. En la tecnología de reciclaje de baterías AEA, el electrolito se puede extraer sumergiéndolo en un solvente adecuado durante algunas horas. Después de la separación de los sólidos residuales, por evaporación a presión reducida, el disolvente puede recuperarse mediante condensación y el electrolito puro sobrante puede recogerse sin purificación adicional. Se usan varios líquidos como solventes de extracción, los cuales deben cum-

plir los siguientes requisitos principales: (i) el punto de ebullición del disolvente, a presión reducida, debe estar por debajo de la temperatura de descomposición de la sal de litio (80°C), y (ii) el disolvente debe estar en un estado anhidro. En este proceso, los electrodos son sumergidos en el disolvente con agitación y calor, a aproximadamente 50°C, de manera de separar los electrolitos de los componentes residuales de cobre, aluminio, acero y plástico. Luego, la mezcla se filtra para separar las partículas del electrodo de la solución que contiene el aglutinante. Las partículas residuales del electrodo son óxido de litio y cobalto y diferentes tipos de carbono. Una forma de evitar el agregado de otros productos químicos al sistema es reducir la mezcla electroquímicamente. Es decir, a medida que el cobalto (III) se reduce a cobalto (II), el litio se libera de la estructura sólida. Aunque la recuperación industrial de litio desde las baterías es limitada, varios autores han informado que la misma es posible. Kim et al. (2004) reportaron un estudio sobre la recuperación de litio usando un tratamiento hidrotérmico del LCO contenido en el cátodo de las LIBs. Este método consiste en la separación simultánea, en un simple paso, del LCO del colector de corriente (lámina de Al), carbono conductor, el aglutinante y el separador utilizando una solución concentrada de LiOH a 200°C sin ningún procedimiento de raspado. Träger et al. (2015) informaron un proceso de reciclaje para LIBs automotrices, dicho proceso consta de dos tecnologías de tratamiento metalúrgico: la evaporación directa al vacío de Li seguida de la recu-

peración de Li metálico por destilación, y una evaporación selectiva de gas de arrastre de Li seguida de la recuperación de óxido de litio.

Otra metodología empleada para reciclar las LIBs es por combinación de algunos de estos procesos: hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos, hidrotermales y/o electroquímicos. Myoung et al. (2002) extrajeron el cobalto de los residuos del LiCoO₂ de los cátodos por medio de la combinación de un proceso hidrotermal que utiliza ácido nítrico con una transformación potencioestática de los iones de cobalto, para formar hidróxido de cobalto (II) que por deshidratación se transforma en óxido de cobalto (II). Paulino et al. (2008) proponen dos rutas en su investigación, en una realizan la fusión de los electrodos con KHSO₄ obteniendo una solución coloreada, luego la lixivian con NaOH y la filtran separando en el precipitado formado, Co(OH)₂. Al filtrado incoloro remanente, se le adiciona una solución saturada de KF precipitando LiF. En esta ruta se reportó una recuperación del 99% de Co y del 50% del Li, como hidróxido de cobalto y fluoruro de litio, respectivamente. En la otra vía, se calcinan los electrodos, después se lixivian dicho residuo con H₂SO₄ y H₂O₂. Finalmente, se agrega KF extrayendo el 94% del cobalto y el 90% del litio, bajo la forma de sulfato y fluoruro, respectivamente. Myoung et al. (2002) informaron un proceso electroquímico en el que los iones cobalto, extraídos del residuo de LCO mediante el uso de una solución de lixiviación de ácido nítrico, se transforman potencioestáticamente en hidróxido

de cobalto en un electrodo de titanio y el óxido de cobalto se obtiene a través de un procedimiento de deshidratación. En la voltamperometría de barrido lineal, se observa un pico de corriente catódica distinta, esto indica que los iones de hidróxido se forman cerca del electrodo a través de electroreducción del oxígeno disuelto y los iones de nitrato dan lugar a un aumento en el pH de la superficie local del titanio. Bajo condiciones de pH apropiadas, el hidróxido de cobalto en forma de isla se precipita sobre el sustrato de titanio y el tratamiento térmico del hidróxido de cobalto da como resultado la formación de óxido de cobalto. Shen, (2002) investigó el proceso de recuperación de cobalto de las LIBs mediante lixiviación con ácido sulfúrico consiguiendo la disolución casi total del cobalto. Luego, purificó el filtrado por electrodeposición a una densidad de corriente 235 A/m², logrando una recuperación neta de cobalto de más del 93%. Este proceso electroquímico fue estudiado con la idea de su aplicación futura a escala industrial; con el que se logra una recuperación de cobalto superior al 93%. La ventaja de este proceso sobre los demás es que mediante la electrólisis se pueden obtener compuestos de cobalto de alta pureza. Sin embargo, este proceso posee la desventaja de un alto consumo de electricidad. En comparación con otros procesos hidrometalúrgicos para reciclar metales de las LIBs, el proceso de electrólisis puede lograr un compuesto de cobalto de muy alta pureza, a partir de estas LIBs, ya que no introduce otras sustancias y, por lo tanto, evita la introducción de im-

purezas. Sin embargo, este proceso tiene la desventaja de consumir demasiada electricidad.

La National Technical Systems reporta un método de reciclado de LIBs, en el que primero se descargan las baterías y luego se las congela a -180°C . Posteriormente, se cortan y separan las partes para incinerarlas a 650°C . Después, se tratan estos residuos con NaOH y/o Na_2CO_3 , los precipitados formados se filtran y lavan obteniendo como producto final el Li_2CO_3 y/o LiOH , de acuerdo al agente químico utilizado.

El proceso patentado por RECUPYL, que en la actualidad es empleado en plantas de reciclado en Estados Unidos, Singapur y España, cuenta con una etapa de lixiviado del material conteniendo litio, para su posterior precipitación mediante el agregado de H_3PO_4 para producir fosfato de litio. Luego, la mezcla de óxidos que queda sin disolver, se vuelve a lixiviar con H_2SO_4 , obteniéndose Li_2SO_4 , el cual es recuperado por filtración. Finalmente, el cobalto se extrae del filtrado por electrólisis de la solución obtenida en la etapa anterior. En esta patente se hace mención al proceso presentado por Sony-Sumitomo, en el cual las celdas de las LIBs se incineran a 1.000°C en un horno. Luego, se cortan las baterías, se separan las partes y después se recupera el cobalto por medio de procesos hidrometalúrgicos.

Por todo lo expuesto anteriormente, se pone de manifiesto la importancia del tratamiento de las LIBs. Actualmente, hay una tendencia global a implementar una legislación que regule la emisión, tratamiento y reutilización de residuos

electrónicos. A pesar de esto muy pocos países, salvo los integrantes de la UE, poseen una legislación vigente (2006/66/EC). Hasta la fecha, Latinoamérica no cuenta con una legislación sobre estos temas, aunque, nuestro país posee un proyecto de ley esperando ser tratado por el Poder Legislativo.

3. Biohidrometalurgia

Desde tiempos remotos, los microorganismos han desempeñado un papel relevante en diferentes procesos de interés para la humanidad, desde su intermediación en la producción de alimentos y bebidas hasta su participación en las enfermedades infecciosas, pero recién hace aproximadamente 150 años la ciencia ha permitido comprender, al menos parcialmente, la naturaleza de la acción microbiana. Obviamente, tampoco la minería es completamente ajena a la intervención de microorganismos; sin embargo, solo en el último medio siglo y, a partir del aislamiento de una bacteria en una explotación minera (específicamente en las minas de Río Tinto, Huelva, España), se ha comprendido la importancia de su participación originándose, de este modo, una nueva especialidad, la biominería, la cual describe, esencialmente, la tecnología de explotación de minerales utilizando la acción de microorganismos. Dentro de la biominería, se designa como biolixiviación al proceso de catálisis, directo o indirecto, que producen ciertos microorganismos sobre el proceso de solubilización de algunos componentes de una matriz insoluble, tal cual es el caso de un mineral, de un desecho electrónico o de cualquier material susceptible a tal acción. El término es suficientemente amplio para incluir un vasto espectro de sustratos que pudieran recuperarse, pero, sin duda, la reacción más estudiada hasta el presente es la recuperación de metales a partir de minerales sulfurados de baja ley, el cual consiste básicamente en la transformación de sulfuros insolubles en sulfatos solubles. Si bien se han

utilizado múltiples cultivos bacterianos para los experimentos de biolixiviación, el género más estudiado y que ha demostrado ser el más eficiente en esta metodología es *Acidithiobacillus*. El mismo, ha sido citado para recuperar Zn, Cu y U desde desechos mineros, degradar el cianuro remanente en la minería del oro y extraer Cu, Ag, U, As, V, entre otras aplicaciones. Este método de recuperación es utilizado sobre fuentes minerales, generalmente de baja ley, que no serían aprovechables por otras metodologías. Otros microorganismos que también han sido estudiados para su utilización en biolixiviación son diversos géneros de hongos, a fin de determinar su eficacia en estos procesos. Uno de los más reportados en bibliografía es *Aspergillus niger*, para la extracción de Cu, Cd y Ni, así como metales preciosos. También se han encontrado trabajos que usan *Penicillium*, *Rhizopus* y *Mucor* para dilucidar los mecanismos por los cuales dichos microorganismos extraen metales desde diversas fuentes.

Los procesos biohidrometalúrgicos están ganando terreno gradualmente en el reciclado de baterías ion litio debido a su mayor eficiencia, menores costos y pocos requisitos industriales. En estos tratamientos se utilizan bacterias quimiolitotróficas acidófilas del género *Thiobacillus* así como de los géneros *Acidithiobacillus*, *Alicyclobacillus* y *Sulfobacillus*, mientras que algunos trabajos utilizan bacterias nativas. El comportamiento bacteriano en la biolixiviación de LIBs se estudia en cultivos aislados puros o combinando varias especies encon-

trando que, generalmente, la disolución se realiza por un proceso biolixivante indirecto, el Co se disuelve más rápido que el Li y que hay diversos metales, como Fe y Cu, que pueden usarse como catalizadores a fin de mejorar esta recuperación.

Si bien los hongos son menos utilizados en biolixiviación, desde hace algunos años ya se reportan trabajos empleándolos en el reciclado de pilas y baterías. Estos microorganismos utilizan varios mecanismos para la disolución de los metales. En general, se procesa toda la pila o batería recuperándose los metales de interés en variada proporción, estando su recuperación influenciada por el pH inicial de los medios de cultivo, por el agregado o no de algunos nutrientes y por el nivel de inóculo, mencionando la importancia de la adaptación previa de estos hongos al medio de cultivo que contiene la muestra a tratar.

c) Procesos de recuperación

Luego de lograda la lixiviación de los componentes del cátodo de las LIBs, comienza el proceso de recuperación de los materiales disueltos en los filtrados provenientes, principalmente, de procesos hidrometalúrgicos. Las metodologías utilizadas, en general, son la precipitación química y la extracción con solventes.

Estos procesos incluyen etapas de separación de los metales contenidos en los lixiviados de las LIBs, los agentes químicos más utilizados fueron: NaOH, Dowex IX, Cyanex 272, Na_2CO_3 y P_5O_7 , para la recuperación del Li; Cyanex 272, D_2EHTA , P_5O_7 , Acorga M5640, $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$, NH_3 , NaOH y PC-88 para separar el Co y, Cyanex 272 e NaOH para separar el Al. Se obtuvieron valores de extracción cercanos al 98%, con los extractantes Cyanex 272, D_2EHTA , P_5O_7 , Acorga M5640, P_5O_7 y Dowex IX. Los solventes extractantes tienen la desventaja de ser caros y su uso a escala industrial no es viable económicamente, lo cual no sucede cuando se usan agentes precipitantes como NaOH, $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$, NH_3 o Na_2CO_3 , los cuales además de permitir valores de recuperación superiores al 50%, son más económicos. Estos procesos tienen varias ventajas como bajo consumo de energía y buena separación de los componentes, pero su fabricación y el reciclado de reactivos son de alto costo. La precipitación química es una operación más simple en que se logra una recuperación mayor de los metales de interés presentes en las baterías y se obtiene un producto de alta pureza y muy buena calidad. Además, si se seleccionan adecuadamente los agentes precipitantes, disminuye el costo de reciclaje. Éste método de la precipitación química consiste en utilizar agentes químicos para precipitar metales valiosos como el cobalto. Contestabile et al. (2001) estudió un proceso de laboratorio destinado al tratamiento y reciclaje de LIBs que se compone de clasificación, trituración y separación selectiva de los materiales activos; disolución de litio y cobalto, y precipitación de hidróxido de cobalto. El cobalto disuelto en la solución clorhídrica se recuperó como hidróxido de cobalto $\text{Co}(\text{OH})_2$ mediante la adición de un volumen equivalente de una solución de NaOH. La precipitación del hidróxido de cobalto comienza con un valor de pH de 6 y puede considerarse que se completó a un pH 8. La precipitación de $\text{Co}(\text{OH})_2$ podría obtenerse usando una solución de amoníaco, una base débil, que forma una solución tampón a pH 9, pero el amoníaco forma complejos estables con el cobalto causando la disolución parcial del hidróxido y evitando así una recuperación cuantitativa. Por lo tanto, el NaOH, que es una base fuerte y permite trabajar con pequeños volúmenes de solución, sigue siendo la mejor opción. A escala industrial, esto puede controlarse usando un sensor de pH adecuado. El precipitado de $\text{Co}(\text{OH})_2$ puede separarse fácilmente de la solución por filtración, para luego reciclarse. Este proceso es más simple y se recupera más metal que con el método de extracción con solvente. Además, puede obtenerse un producto de alta pureza que cumpla con los requisitos generales de los productos químicos y su costo de reciclaje será bajo si se elige eliminar la impureza o purificar los productos recuperados en el proceso de reciclaje de las LIBs. La clave es elegir agentes de precipitación química apropiados.

The background is a solid teal color. It features several yellow zigzag lines that create a stylized mountain range or abstract geometric pattern across the page. The lines vary in height and slope, with some peaks and valleys. The number '8.' is positioned in the upper left area, and the main title is in the lower left area.

8.

**Investigaciones
pioneras en torno
al futuro del litio**



En 2022 SQM inauguró una nueva planta piloto de ocho millones de dólares en El Carmen dedicada exclusivamente a desarrollos experimentales del litio. Una inversión gigantesca que busca dar valor agregado al litio, ser competitivos y demostrar al Estado, con vista a 2030, que SQM es la mejor empresa para producir litio en Chile, con un área de investigación y desarrollo potente, con un 98% de profesionales chilenos.

SQM Salar dedica parte importante de sus recursos a generar apasionantes y pioneras investigaciones que se adelantan al futuro del litio. Crear innovaciones para el litio significa convivir en tres horizontes temporales. Uno es el corto plazo, abocado a resolver los problemas actuales que no pueden esperar mucho tiempo. Aquí se utiliza lo que hay, lo que ya se sabe y lo que se puede comprar hoy día. Es una innovación incrementada para mejorar lo que ya se tiene, y gran parte del trabajo diario de los procesistas del Salar y de las plantas de El Carmen. El mediano plazo corresponde a los proyectos de innovación aprobados que están en ingeniería y que ya están a cargo de la vicepresidencia de proyectos. Es una etapa de innovación estructurada, que requiere hacer un seguimiento muy sistemático de todas las fases de ingeniería, procesos de compra y mejoras técnicas. Y, finalmente, vienen los proyectos de largo plazo, que son las tecnologías más disruptivas, radicalmente diferentes a lo que hace la empresa en el presente. Aquí caben las apuestas, las ideas insólitas y las visionarias.

En el Salar de Atacama hay cinco pilotos que se están trabajando para ese horizonte de largo plazo. Y además de esos pilotos, hay otros diez proyectos en fase de laboratorio y decenas más en etapa de “servilleta”, que es como llaman a una propuesta en su etapa germinal, antes de ser testada. La aspiración es que de esos cinco o seis pilotos que miran al largo plazo, uno o dos se conviertan en proyectos de mediano plazo, con ingeniería y pruebas industriales. Si les va bien y son aprobados, en dos o tres años podrían salir de los planos y laboratorios y pasar a ser parte del proceso de producción real del litio.

La revolución del sulfato de litio

Una innovación importantísima del área de innovación y desarrollo de SQM Salar es la creación de un proceso para extraer sulfato de litio de las sales de carnalita cosechadas de las pozas de evaporación solar. Osvaldo Yáñez lideró una investigación revolucionaria que permitirá extraer un valor económico de un material que parecía ser un descarte y que hasta ahora no habían logrado encontrar la forma de recuperar. Ese sulfato de litio también servirá para producir el hidróxido de litio más barato del mundo, con un consumo de agua y una huella de carbono considerablemente menores en comparación con cualquier otro proceso en el mundo.

El proceso de evaporación en el Salar de Atacama está orientado a elevar la concentración del cloruro de litio en la salmuera. Para lograr este objetivo, y aprovechando las favorables condiciones climáticas de la zona, con las tasas de evaporación más altas del planeta y precipitaciones ausentes durante gran parte del año, se logra un nivel de concentración de la salmuera de litio desde un 0,2% a valores en torno al 5% en las pozas más enriquecidas. Este no es un proceso sencillo, ya que deben considerarse variables como la composición química de la salmuera en los más de 300 pozos de extracción, donde la variabilidad no solo se encuentra en el contenido de litio, sino también de los contaminantes principales, como el magnesio, calcio y sulfato. Este último es particularmente perjudicial para el proceso de concentración, debido a que cuando se encuentra en niveles elevados, provoca una precipitación no deseada de sulfato de litio, haciendo que esta sal cristalice en el fondo de la poza, generando pérdidas de rendimiento del proceso global. La cristalización del sulfato de litio ocurre normalmente en el campo de precipitación de la carnalita de potasio, razón por la cual muchos de sus acopios históricos en el Salar presentan contenidos interesantes de sulfato de litio.

De ahí surgió el interés de SQM por recuperar este sulfato de litio, pero, naturalmente y como suele ocurrir en esta industria tan joven, no existía ningún proceso descrito en la literatura para tratar estas sales. En esa necesidad, SQM debió partir desde cero.

En línea con el desarrollo de un proceso sustentable, SQM se propuso utilizar la planta MOPH II, existente desde 2011 y concebida originalmente para la producción de cloruro de potasio. Este nuevo proceso no requería construir una nueva planta productiva, lo cual representaba una ventaja enorme en materia de costos de inversión, ingeniería, plazos de ejecución, y, por supuesto, sustentabilidad.





El equipo a cargo del proyecto de sulfato de litio, de izquierda a derecha: Matías Rioseco, jefe de turno MOPH II; Álvaro Ulloa, ingeniero de procesos; David Castillo, jefe de planta MOPH II; Camila Uribe, jefa de procesos; Patricio Avendaño, superintendente de procesos; David Torres, superintendente de producción.

En 2004, se llevaron a cabo los primeros desarrollos con el objetivo de recuperar el cloruro de potasio a partir de las sales de carnalita. Durante este proceso, el sulfato de litio era considerado un aspecto secundario, ya que el enfoque principal estaba en la obtención de cloruro de potasio. Para lograrlo, se utilizó la técnica de flotación, la cual es ampliamente empleada en la industria del cobre, potasio y otros metales. Sin embargo, el concepto de flotación de sulfato de litio a partir de sales de carnalita de potasio era algo totalmente nuevo y donde el primer obstáculo consistía en encontrar el colector adecuado para la flotación de esta enigmática sal. Numerosas pruebas a escala de laboratorio dieron con el colector adecuado, logrando flotar exitosamente el sulfato de litio y llevarlo a concentraciones interesantes. Las pruebas metalúrgicas dieron cuenta del alto potencial para el desarrollo de este proceso, ya no solo para lograr un alto rendimiento, sino además a partir de un producto de alta calidad con contenidos de sulfato de litio en el concentrado en torno al 90%. No obstante lo anterior, y por decisiones estratégicas de la compañía, el proyecto sufrió un congelamiento que se prolongó por varios años, dejando un legado de información valiosa que podría servir para el futuro. Osvaldo Yáñez estuvo más de diez años tratando de empujar ese proyecto, porque estaba seguro de que se podía rescatar el sulfato de litio de las carnalitas, pero en ese entonces las condiciones del mercado y de acuerdos con Corfo no se alineaban con este propósito.

Años más tarde, en 2017, David Torres, en ese instante ingeniero metalurgista, junto con su equipo del laboratorio metalúrgico, motivados por el aumento de la demanda de litio a nivel global, siguieron perfeccionando la técnica de flotación en pequeñas celdas que no superaban los cuatro litros. Hubo que partir nuevamente de cero, desde pedir un pequeño frasco de colector a los proveedores brasileños a volver a estudiar los avances de los estudios anteriores. Era un tímido intento por volver a potenciar un alicaído proyecto que a todas luces podría representar un nuevo impulso para la compañía. Estas pequeñas e improvisadas pruebas avanzaron hasta llegar a un producto cercano al 88% de pureza de sulfato de litio, luego de un pro-

Con el nuevo proceso de sulfato de litio se economizan muchos pasos y, por lo tanto, se ahorran energía e impactos medioambientales. En desarrollos de I+D hechos en casa está el valor agregado de SQM.

ceso de lixiviación con agua. De estos desarrollos, se obtuvo una muestra de concentrado de sulfato de litio de unos tres kilos, que se presentó a algunos ejecutivos como muestra de que era tiempo de retomar el proyecto, pero no encontraron la acogida que esperaban. Poco tiempo después, cuando explotó el proyecto de sulfato de litio, con esa misma pequeña muestra se iniciarían los desarrollos de purificación.

Luego del acuerdo celebrado entre Corfo y SQM en 2018, y con un aumento en la demanda del litio, la compañía puso sus ojos nuevamente en el proyecto de sulfato de litio, esta vez con un acotado grupo de jóvenes ingenieros de procesos, liderados por el gerente de innovación y desarrollo Osvaldo Yáñez. El equipo se propuso llevar adelante las promisorias pruebas de laboratorio a un nuevo nivel, cuyo objetivo sería la primera producción en el mundo de sulfato de litio a escala industrial bajo esta metodología, en uno de los procesos que se vislumbraba como de los más sustentables para este tipo de sales, con la menor huella hídrica y de carbono conocidas a la fecha. Este nuevo proceso de producción de sulfato de litio, desarrollado por ingenieros chilenos, tiene un consumo de agua considerablemente bajo en comparación con otros procesos desarrollados en plantas concentradoras del Salar de Atacama. Esto se justifica en la idea de sustentabilidad y en que, en términos de procesos, se busca mantener un estricto equilibrio químico de la salmuera de planta, lo cual se vería alterado con un ingreso excesivo de agua en el sistema.

En línea con el desarrollo de un proceso sustentable, se propuso utilizar la planta MOPH II, una planta existente desde 2011 y concebida originalmente para la producción de cloruro de potasio. Esto representaba, además, una ventaja enorme en materia de costos de inversión, ingeniería y plazos de ejecución.

Lo primero que se hizo fue optimizar el proceso en el laboratorio metalúrgico y planta piloto de SQM, entender los equilibrios propios de la salmuera con las sales de alimentación y el impacto que tendría tanto en el rendimiento como en la calidad del producto. La elección de las sales de alimentación debió realizarse cuidadosamente, no solo por la abundancia

del sulfato de litio en su composición, sino por la presencia de contaminantes que pueden ser perjudiciales en el proceso.


Ya con el conocimiento más robusto del proceso, se fue afinando el diagrama de flujos en la planta MOPH II, para posteriormente avanzar en los detalles de ingeniería para la inédita conversión de una planta concentradora de KCl en una planta concentradora de sulfato de litio. Lo importante era aprovechar la infraestructura existente, desde los acopios de alimentación, correas transportadoras, *stock pile*, equipos de molienda y clasificación, celdas de flotación, estanques, espesadores, filtros de producto, entre otras instalaciones, muchas de las cuales debieron adecuarse al nuevo proceso. Todo esto, en un acotado período de tiempo.

Si bien las expectativas eran altas, no había certeza de cómo reaccionaría la planta MOPH II ante este nuevo tipo de sales, tomando en consideración que los parámetros operacionales serían completamente diferentes de los que se tenía históricamente del cloruro de potasio. Para esto fue necesario capacitar a ingenieros de operaciones, ingenieros de procesos y operadores en lo que sería la primera prueba industrial para la producción de sulfato de litio. Otro aspecto relevante fue el desarrollo de nuevas metodologías analíticas para la medición de elementos, que estuvo a cargo del área de Desarrollos Analíticos en Antofagasta y del Laboratorio Químico ubicado en el Salar de Atacama.

El complejo MOPH II, que originalmente fue construido para la producción de cloruro de potasio o KCl, actualmente se está utilizando para la primera producción industrial de sulfato de litio en el mundo. La planta adaptada hoy es alimentada con las sales de carnalita de potasio, que contienen en promedio 1,8% de sulfato de litio. Para recuperar ese litio es mezclado con una salmuera dentro de unas máquinas llamadas celdas de flotación, un dispositivo utilizado en procesos de separación de minerales donde se generan burbujas de aire para llevar a cabo la adhesión selectiva de partículas de valor a estas burbujas, permitiendo su separación de otras partículas indeseables en una suspensión acuosa. En el proceso del sulfato de litio, se agrega un aditivo llamado colector. Ese colector envuelve a las



Un desafío era recuperar el litio que queda impregnado en las sales de bischofita sin que se disuelva el magnesio, un contaminante muy difícil de eliminar en la planta. La solución ha sido regar la bischofita con cantidades muy acotadas de agua para evitar que se vuelva a disolver el magnesio.



Luego de un proceso de flotación que separa el sulfato de litio de la carnalita de potasio, este se seca en un tambor rotatorio y se envasa en maxisacos. La carnalita de descarte alimenta a la vecina planta SOP-H para producir KCl, donde también se produce el sulfato de litio. El KCl es enviado a Coya Sur como materia prima para la producción de nitrato de potasio.

partículas de sulfato de litio selectivamente y le da un recubrimiento que la vuelve hidrofóbica. Luego se inyectan burbujas de aire a la celda de flotación y entonces ocurre la magia: las partículas de sulfato de litio se adhieren a las burbujas. Las burbujas quedan rodeadas de partículas de sulfato de litio y la carnalita queda fuera de este acoplamiento. Las burbujas, por densidad, suben cargadas de sulfato de litio. En las celdas de flotación, las partículas de sulfato de litio se van flotando en millones de burbujas, mientras que la carnalita de potasio queda en el fondo. Luego, el material húmedo de sulfato de litio se seca en un tambor rotatorio y se envasa en maxisacos. Así de rápido y de sencillamente se produce el sulfato de litio en esta planta. El descarte que queda es una carnalita de potasio capaz de alimentar a la planta vecina SOP-H, para producir KCl. Es decir, este proceso de sulfato de litio, único en el mundo, produce sulfato de litio y cloruro de potasio al mismo tiempo. A todo lo que entra se le saca provecho. El KCl generado en la Planta SOP-H es enviado a las instalaciones de SQM en Coya Sur como materia prima para la producción de nitrato de potasio. La Planta SOP-H fue la segunda planta construida en el Salar de Atacama para la producción de sulfato de potasio en 1998 y actualmente opera gran parte del año en la modalidad de producción de KCl.

Durante 2021 el equipo de innovación y desarrollo estuvo un mes y medio haciendo la prueba industrial para producir 9.000 toneladas de sulfato de litio. Una vez envasado, fue enviado a China. El proyecto consiste en producir inicialmente 20.000 toneladas anuales de sulfato de litio. Las expectativas apuntan a superar las 70.000 toneladas anuales en el corto plazo.

Ese sulfato de litio SQM será enviado a China para que los socios de allá lo conviertan directamente en hidróxido de litio. Con este nuevo proceso creado por SQM se ahorran costos, gasto energético e impactos medioambientales. Un desarrollo de I+D totalmente hecho en casa.

Es una forma de producción de hidróxido de litio más eficiente y barata que la que hace actualmente SQM a partir de carbonato de litio. Y radicalmente más económica que el proceso que se hace en el resto del mundo para obtener sulfato de litio a partir del concentrado de espodumeno.



Junto a las pozas, se habían acumulado durante años cerros de sales de carnalita, hasta que el equipo de Osvaldo Yáñez y David Torres desarrolló un innovador proceso para recuperar de ellos sulfato de litio y darle valor a un producto de descarte. La planta MOPH II, construida para producir cloruro de potasio, hoy se utiliza en la primera producción industrial de sulfato de litio en el mundo.



En Australia y otros países el sulfato de litio se obtiene explotando minas a rajo abierto, el mineral de roca es sometido a procesos de cominución para liberar las especies de interés, luego es llevado a un proceso de concentración por separación de medios densos y/o flotación donde se concentra el espodumeno a niveles cercanos al 5,5% Li_2O . Este concentrado es posteriormente calcinado a altas temperaturas, cambiando su estructura cristalina, a esto le sigue un proceso de tostación ácida con ácido sulfúrico donde, a través de un proceso de lixiviación, se obtiene una solución enriquecida de sulfato de litio. Un tratamiento largo, costoso y complejo que en el Salar de Atacama se van a saltar por completo, ya que el sulfato de litio se obtendrá directamente de acopios de carnalita de descartes. El hidróxido de litio más barato del mundo. Un proceso patentado y creado completamente por el equipo interno de innovación y desarrollo de SQM.

La decisión de enviar este sulfato de litio a China para la etapa final de conversión a hidróxido de litio se debe a que para hacerlo localmente sería necesario construir una planta específica parecida a las que procesan concentrado de espodumeno en el extranjero y eso puede tardar cinco a seis años, desde obtener los permisos ambientales hasta el término de la construcción. También resulta conveniente comercialmente, porque el hidróxido de litio producido en China se vende en ese mismo país, donde están los clientes. No obstante lo anterior, SQM está evaluando la posibilidad de realizar la conversión de sulfato de litio a hidróxido de litio en nuevas plantas que serían construidas en el norte de Chile.

Repensando el futuro de las pozas de evaporación solar

Los 44 kilómetros cuadrados de pozas de evaporación solar son el corazón de las faenas de explotación del litio en el Salar de Atacama, que permiten rescatar litio y otros minerales de las salmueras a muy bajo costo energético, económico y medioambiental. Un sistema que ya estaba estudiado y diseñado cuando SQM compró el proyecto Minsal en los años 90 para explotar el Salar de Atacama. Resultó muy eficiente para producir cloruro de potasio, que era el gran objetivo de la compañía inicialmente, no para producir litio como producto prioritario. En los primeros 15 años de explotación se hizo muy poco por mejorar la eficiencia del litio, que era de apenas un 25%: de todo el litio que contenían las salmueras al entrar al circuito de pozas de evaporación solar, el 75% se perdía en el camino y solo el 25% se recuperaba.

Entre 2005 y 2010, cuando empezó a subir la demanda de litio, se esbozó la búsqueda por mejorar la productividad de litio en las pozas. Se hicieron varias mejoras, como definir los tipos de salmuera que tenían mejor productividad para la línea de producción del litio y cuáles tenían mejor rendimiento para potasio. También se priorizó el ingreso de salmuera con mayor contenido de calcio, que ayudaba a tener menos pérdidas, para la ruta de evaporación del litio. Con esos pequeños cambios, la productividad del litio aumentó de un 25% a un 40%.

Gran parte del litio se perdía en la etapa de precipitación de sales que ya empiezan a recuperarse gracias al innovador proceso descrito en el capítulo anterior.

El sulfato de litio se obtendrá de acopios de carnalita que eran considerados descartes. Es decir, será el hidróxido de litio más barato del mundo y la huella de carbono y consumo de agua también más bajos.

Luego de la precipitación de carnalitas venía otro tipo de pérdidas de litio, llamadas pérdidas por impregnación. En la medida que el litio se va concentrando en las soluciones, las últimas sales que cristalizan y que tienen alto magnesio son las bischofitas, que llevan impregnada una cantidad importante de litio justo en las etapas finales, cuando la salmuera está más concentrada. El desafío era recuperar ese litio que quedó impregnado sin que se disuelva también el magnesio, que es un contaminante muy difícil de eliminar después en la planta de El Carmen. Eso se ha solucionado con procesos de riego de la bischofita con cantidades de agua muy acotadas para evitar que se vuelva a disolver el magnesio. El desafío del jefe de operaciones Franco Núñez es mantener altas tasas de recuperación de litio en esta etapa, con una salmuera drenada con el mayor litio posible, para superar las 20.000 toneladas anuales de litio carbonato equivalente. Para ello se han debido mejorar las técnicas de riego y la mezcla adecuada de agua y salmuera, entre otros parámetros operacionales.

Una tercera medida que se incorporó consiste en agregar potasio artificialmente de vuelta a la salmuera, porque ayuda a eliminar magnesio del sistema y esto aumenta el rendimiento del litio en las pozas de evaporación. Estas tres medidas han permitido mejorar la productividad del litio en las pozas de evaporación a un 55% y se espera que en uno o dos años la eficiencia supere el 60%.

Mejorar la recuperación de litio más allá de ese umbral es difícil. La única alternativa es usar un sistema de recuperación distinto al de las pozas de evaporación solar. En el último tiempo, Gabriel Meruane, gerente de investigación y procesos, junto a su equipo de investigadores se han dedicado a mapear tecnologías para mejorar la productividad. Más de 50 empresas tecnológicas, universidades y pequeñas *startups* de Alemania, Francia, Estados Unidos, Inglaterra, Chile y otros países presentaron soluciones tecnológicas interesantes. Algunas están siendo trabajadas a nivel de laboratorio, a nivel de evaluación conceptual o a nivel de pilotaje. Durante 2022 se probaron tres pilotos en Salar de Atacama y uno en El Carmen de tecnologías alternativas a las pozas de evaporación:

Las nuevas opciones en evaluación no reemplazarán el sistema de pozas de evaporación solar, que tiene ventajas insuperables en eficiencia energética, nula contaminación y bajo costo. Pero si se utilizan de manera focalizada, ayudarán a incrementar el rendimiento.

Algunos clientes ya piden niveles superlativos de pureza y, para alcanzarlos, no basta la mejora continua. Se requiere un salto tecnológico disruptivo. Uno de los procesos nuevos más prometedores es la bicarbonatación, efectivo caro y complejo, pero apto para un mercado de baterías dispuesto a pagar por una pureza nivel diamante.

1. Proceso de adsorción: este piloto se trabajó en el Salar de Atacama durante el primer semestre de 2022. Se trata de unas resinas con forma esférica que en la superficie tienen espacios que calzan muy bien con una molécula de cloruro de litio. Cuando esta resina, a temperatura ambiente, entra en contacto con una salmuera que contiene cloruro de litio, este se encaja adentro y queda retenido en la estructura de la resina. El proceso comienza con la etapa de extracción de litio, en que se hace pasar la solución (salmuera) a través de una columna cargada con resina, lo que genera un efecto similar al de los filtros de agua donde el litio va quedando atrapado en la resina por un proceso que se llama adsorción. La primera columna atrapa alrededor de 50 libras de litio. Después la salmuera pasa por una segunda columna, que atrapa otro porcentaje de litio y ya después de pasar por la tercera columna de la serie casi no queda litio en la salmuera, más del 90% del litio de la solución ha quedado atrapado en ese paso.

La segunda etapa consiste en una fase de lavado de las columnas para extraerles el magnesio, sulfato y otras impurezas que quedaron impregnadas, pero no fueron adsorbidas. Luego de eso viene la fase de desorción o recuperación del litio de su envoltura, esto se consigue mediante el paso descendente de agua en la columna, el litio queda en una solución más limpia donde solo hay cloruro de litio y porcentajes mínimos de las demás impurezas. La salmuera, tal como salió del pozo, pasa por este proceso y sale transformada en esa solución agotada en litio, mientras que el litio fue purificado más no concentrado, en una solución acuosa.

Parece magia. El problema es que la desorción exige calentar y eso requiere un gasto de energía para liberar el litio, lo que tiene un costo. Y, sobre todo, para liberar el litio es necesario usar grandes cantidades de agua fresca. Algo que va contra la baja disponibilidad de agua en el Salar y no está alineado con las metas de reducir su uso que están comprometidas en el Plan de Sostenibilidad de SQM. En el Salar Hombre Muerto, en Argentina, existe una planta de este tipo y en China hay cuatro plantas que utilizan resinas similares. Usan el agua y después la evaporan, entonces los consumos hídricos que tienen son 50 veces más altos que en SQM.

Los procesistas del Salar están estudiando cómo integrar un sistema de reconcentración que recupere el agua y la recircule, para que este diseño sea también sustentable en términos ambientales.

2. Sistema de evaporación forzada modular: se trata de un sistema que no evapora las salmueras en grandes pozas con la luz del sol, sino que utiliza la evaporación forzada, potenciada con energía eléctrica. Recupera el agua y permite concentrar las soluciones ricas en litio. La ventaja que tiene es que es de crecimiento modular. No es necesario construir una planta gigantesca, sino que se puede instalar un módulo más pequeño y después agregar dos o tres módulos más según la necesidad. El proceso se impulsa solo con electricidad.

Este sistema se podría usar para evaporar y concentrar las salmueras directamente desde los pozos, formar sales y removerlas o podría ser utilizado en las soluciones que salieron del proceso de adsorción –que tenía mucha agua– para recuperar el agua y obtener también la salmuera concentrada. Se pueden combinar ambas ideas, las del piloto uno y piloto dos. La evaporación solar que en las pozas actuales demora entre 12 y 18 meses, en un evaporador forzado demoraría dos o tres horas. Se ahorraría muchísimo tiempo, pero el costo es mucho más elevado. Por eso el crecimiento modular es conveniente: se puede comenzar con un evaporador pequeño.

3. Membranas de filtración: es un sistema parecido al de los sistemas de purificación de agua por osmosis inversa. Cabe destacar que esta tecnología no es una DEL (direct lithium extraction) como tal, sino más bien un equipo para viabilizar salmuera de alto sulfato o con contenido de magnesio lo suficientemente complejo para el proceso actual en pozas. Consiste en inyectar agua a través de una membrana que tiene agujeros tan pequeños que lo único que puede pasar son moléculas del tamaño del agua. La membrana tiene una carga eléctrica que repele los iones cargados, por lo tanto lo único que pasa hacia el otro lado es agua. Esta tecnología se usa hace décadas para purificar agua de mar en algunas zonas costeras.

Aplicada al litio, la membrana ya no tiene los agujeros tan pequeños y la carga eléctrica es menor, por lo tanto repele los iones con cargas grandes, que son los iones con carga dos, pero deja pasar los iones con carga menor. A esa membrana menos selectiva se le llama membrana de filtración. Lo interesante es que los principales contaminantes que acompañan a las salmueras con litio de SQM son el magnesio, que tiene carga dos, y el sulfato, que tiene carga menos dos, mientras que el litio tiene carga uno. El litio puede pasar por la membrana, pero el magnesio y el sulfato no.

La salmuera que se obtiene una vez que se aplica esta membrana es una solución con cloruro de litio, cloruro de sodio y cloruro de potasio, pero sin magnesio ni sulfato. El rendimiento de esa salmuera en vez de ser 60% es de 80%, ya que al separar las sales de sodio y de potasio, se pierde algo de litio mediante el fenómeno de impregnación antes mencionado. El rendimiento no es perfecto, pero mejora mucho. Por otro lado, es un sistema que requiere una inversión importante, un gasto de energía y la reposición de las membranas, que se van dañando por el tiempo. El equipo de investigación está estudiando dónde sería más eficiente, si conviene usarlo en todo el sistema o solo en lugares donde las salmueras tienen demasiado magnesio, demasiado sulfato, y es más difícil la recuperación del litio. En el conjunto de pozos productivos del Salar hay salmueras que tienen un rendimiento de 70% del litio y otras de solo 30%. Una opción sería partir por esas últimas para ver si se logra un mejor rendimiento con el sistema de membranas de filtración.

4. Extracción por solvente: al lado del pilotaje de las membranas se hará otro piloto en un espacio pequeño, con un equipo francés que va a probar una tecnología de extracción por solvente. Funciona mezclando la salmuera que contiene cloruro de litio con una sustancia líquida orgánica parecida a una parafina, que atrapa selectivamente las moléculas de cloruro de litio en un proceso de agitación de ambas fases y deja pasar las sales no deseadas. Esa solución se deja decantar y la fase orgánica en donde quedó el litio se separa de la fase acuosa sin litio. Esa fase orgánica



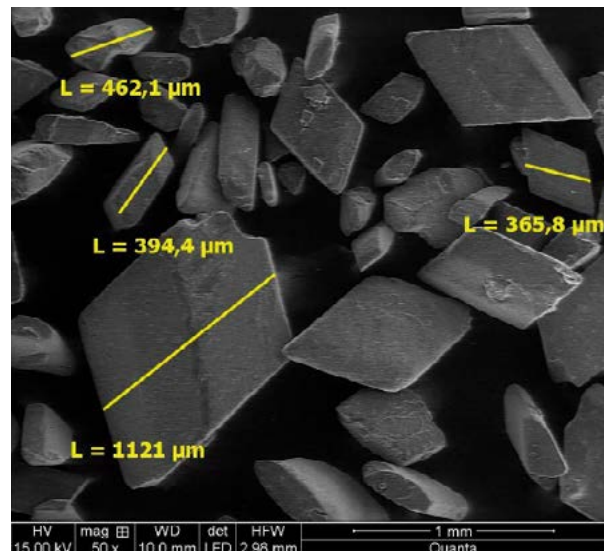
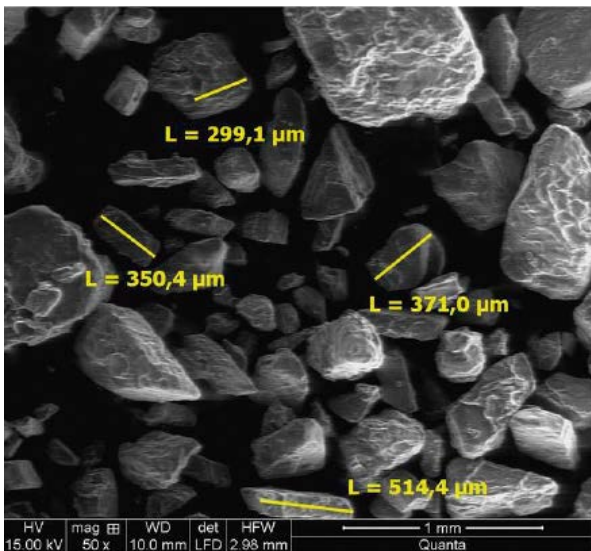
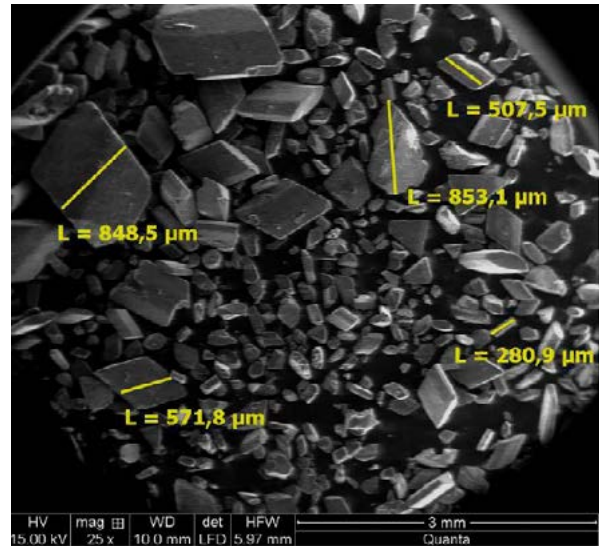
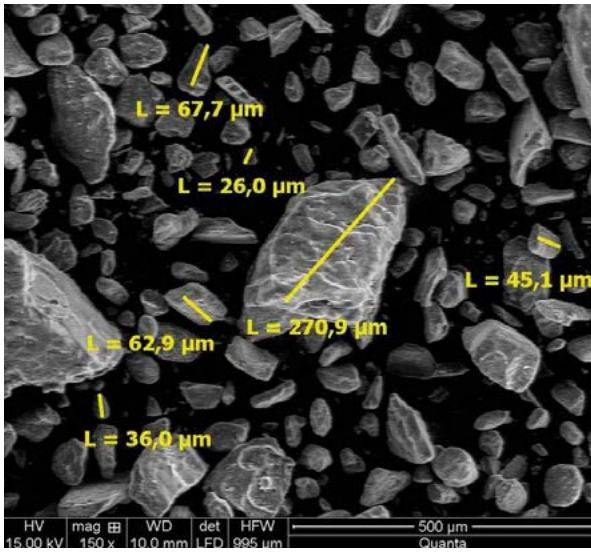
se vuelve a mezclar con salmueras limpias de impurezas, se calienta la temperatura a 80°C y el cloruro litio pasa a la otra solución donde queda muy concentrado y con niveles mínimos de impurezas. Al estar concentrado, el consumo de agua es menor.

Es el proceso más selectivo de los que se han estudiado, pero el problema es que emplea solventes orgánicos. Requeriría grandes estanques con estos solventes y esto en el Salar de Atacama tendría un riesgo ambiental muy grande. En el piloto se está estudiando a escala pequeña cómo podría usarse sin riesgos sobre el entorno.

Estas y otras opciones en evaluación no van a reemplazar el sistema de pozas de evaporación solar, que tiene ventajas insuperables en eficiencia energética, nula contaminación ambiental y bajo costo. La energía térmica que generan las pozas de evaporación utilizando solo la radiación del sol equivale a unos 100 giga watts de energía, lo mismo que producen cinco plantas termoeléctricas a carbón. Pero algunas de estas tecnologías, utilizadas de manera responsable, podrían ayudar a incrementar el rendimiento tomando fracciones de las salmueras en los sectores del Salar donde actualmente hay más pérdidas de litio.



En 2019 se construyó una planta piloto de 740 metros cuadrados en El Carmen para que el equipo de investigación e innovación de SQM desarrollara el proceso para producir hidróxido de litio en Australia, a partir de muestras de espodumeno concentrado enviadas desde Oceanía.



Fotografías microscópicas de cristales de hidróxido de litio captadas en el laboratorio del área de investigación de litio SQM.

La bicarbonatación y el hidróxido de litio por electrolisis

En los últimos años se hicieron grandes mejoras en las plantas de litio para bajar el nivel de impurezas a los estándares requeridos por el mercado de baterías. Pero algunos clientes están pidiendo niveles superlativos de pureza que para alcanzarlos no basta la mejora continua, sino que requieren un salto tecnológico disruptivo. Uno de los procesos nuevos más prometedores que están probando en etapa piloto es la bicarbonatación. Consiste en transformar el carbonato de litio en bicarbonato y luego volver a convertirlo en carbonato de litio. En ese proceso, todas las impurezas pasan al bicarbonato, y se quedan ahí, separadas del carbonato de litio. Es un proceso efectivo pero más caro y complejo, que no se puede hacer a escala completa en las 200.000 toneladas anuales de litio que procesa la planta. Pero sí se pueden producir 20.000 o 30.000 toneladas con este proceso para un mercado de baterías dispuesto a pagar este nivel de pureza nivel diamante.

La última innovación que se está estudiando a nivel piloto para las plantas de El Carmen es la creación de un proceso alternativo al que se ocupa hoy para hacer hidróxido de litio, que requeriría construir un nuevo tipo de planta. El sistema convencional que usa SQM es producir carbonato de litio y ese carbonato es materia prima para el hidróxido. La ventaja de ese doble proceso es que purifica el litio y el producto final es de primera calidad a nivel mundial. La desventaja es que usa parte del carbonato de litio y ese carbonato queda como un residuo sólido, carbonato de calcio, que hoy no tiene uso y por lo tanto tiene una huella de carbono.

Cuando Gabriel Meruane llegó a trabajar al equipo de litio en 2019, este fue uno de los primeros asuntos que le preguntó Carlos Díaz, su jefe:

-Oye, esta cuestión del hidróxido de litio que se hace en dos etapas, ¿no se puede hacer en una sola?

Meruane respondió con su estilo habitual:

-Siempre se puede. La pregunta es cuánto nos va a costar.

Con sus procesistas hizo 50 simulaciones en computador hasta que

llegaron a algo que les pareció interesante: tomar la salmuera que viene en camiones desde el Salar, purificarla y producir hidróxido de litio.

Las primeras pruebas fueron hechas en un laboratorio del área de nitratos yodo, en María Elena. El proceso funcionó, así que pidieron presupuesto para desarrollar una ingeniería conceptual, que derivó en una patente que ya está aprobada. Luego, en 2021, hicieron un pilotaje de mayor escala para el mismo proceso, donde produjeron 500 kilos de un hidróxido de litio con la calidad esperada. Ese proceso, creado en SQM, ya está desarrollado en términos de ingeniería y patentado. Tiene la mitad de la huella de carbono del proceso convencional, consume menos agua, menos energía eléctrica, es más barato y tiene mejor rendimiento, porque requiere una sola planta. Actualmente está en evaluación ambiental.

Sin embargo, todavía no se está aplicando porque sería necesario construir una planta diferente a la que existe hoy.

El mismo equipo está haciendo otro piloto en la planta química de El Carmen que tiene como objetivo utilizar energía de electrolisis para el hidróxido de litio. Es parecido a la electrolisis de agua que se usa para producir hidrógeno verde. Se aplica corriente eléctrica al agua y como resultado se separan el hidrógeno y el oxígeno. En este caso, el proceso se adaptó a la salmuera que viene desde el Salar con cloruro de litio y se agrega una membrana para que, al aplicar corriente, el litio se mueva hacia el otro lado de la membrana y se genere hidrógeno e hidróxido de litio. Solamente usando la electrolisis se puede generar una solución de hidróxido de litio a partir de una solución de cloruro de litio. Ya no habría necesidad de usar toneladas de reactivos químicos como hidróxido de sodio (soda cáustica) ni ceniza de soda importada en barcos. La huella de carbono sería baja, solamente asociada al uso de energía eléctrica.

Este es un proceso muy prometedor y fácil de manejar porque es conocido. La electrolisis se usa en todo el mundo para producir hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. Lo novedoso es emplearlo para producir hidróxido de litio, que no se ha hecho hasta ahora.

Proyectos en Australia y China

Algo novedoso que ha pasado debido a la alta demanda de hidróxido y carbonato de litio es que la compañía ha empezado a externalizar algunas operaciones de transformación del producto fuera de Chile. SQM ha tenido que buscar socios para convertir y refinar más carbonato e hidróxido de litio, porque las capacidades de las plantas de El Carmen no siempre dan abasto. La capacidad de molienda es limitada, por lo tanto la empresa ha recurrido a socios en China y en Corea que ayuden a moler los productos al tamaño requerido por los clientes. Desde la planta de El Carmen se envía el carbonato de litio cristalizado a Corea para molerlo a un tamaño micronizado, similar a pasar de un grano de azúcar a azúcar flor. También se envía carbonato cristalizado a China para hacer transformaciones a hidróxido y molienda.

No solo eso. La empresa busca nuevas minas de litio fuera de Chile para diversificar su suministro. Diversos equipos de hidrogeología e innovación y desarrollo han recorrido el mundo en busca de nuevas fuentes de litio. Andrés Fock y Osvaldo Yáñez han ido Canadá, México, Alemania, China y Australia en este afán de encontrar nuevas minas y comprobar la viabilidad de su explotación.

Un proyecto de litio a partir de salmueras en el Salar Caucharí, en Argentina, fue finalmente vendido por SQM por dos motivos. El primero, desde el punto de vista de la extracción de la salmuera desde el Salar, el proceso productivo era muy diferente a lo que se hacía en Chile, más desafiante de lo que esperaban y era necesario elegir un foco: seguir ampliando la capacidad en el Salar de Atacama o llevar a los especialistas de SQM a Argentina. En Caucharí había otro socio, una empresa canadiense que exigía que SQM invirtiera una cantidad importante de recursos para seguir desarrollando el proyecto. SQM prefirió vender su participación y seguir con la ampliación productiva en Chile que permitió la renegociación del contrato con Corfo.

Por otro lado, surgió la oportunidad de tener una participación en una mina de espodumeno en Australia junto con un socio local, Wesfarmers.

Se trata de un desafío nuevo ya que es la primera vez que SQM empiece a extraer litio de roca. Sin embargo, en Australia hay una docena de minas que extraen litio a partir de roca o espodumeno, por lo tanto existe una experiencia metalúrgica e información suficiente para implementar un proyecto seguro.

Este país no tiene plantas refinadoras, todo su espodumeno es enviado a tratar a China. SQM va a producir espodumeno desde la mina y está instalando en Australia su propia planta refinadora, que es lo que tradicionalmente se hace en China, no en el mismo país. Ese va a ser el valor agregado que va a aportar SQM en Australia cuando la planta comience a funcionar en 2024: procesar inmediatamente el mineral que se extrae localmente y vender hidróxido de litio desde Australia a los mercados de Asia y Europa. Es un proyecto grande, de 1.500 millones de dólares, que actualmente está en fase de construcción. El campamento, el aeropuerto, las líneas de agua e infraestructuras principales de la planta concentradora están listas. El avance se encuentra en la mina y en el comisionamiento de los equipos.

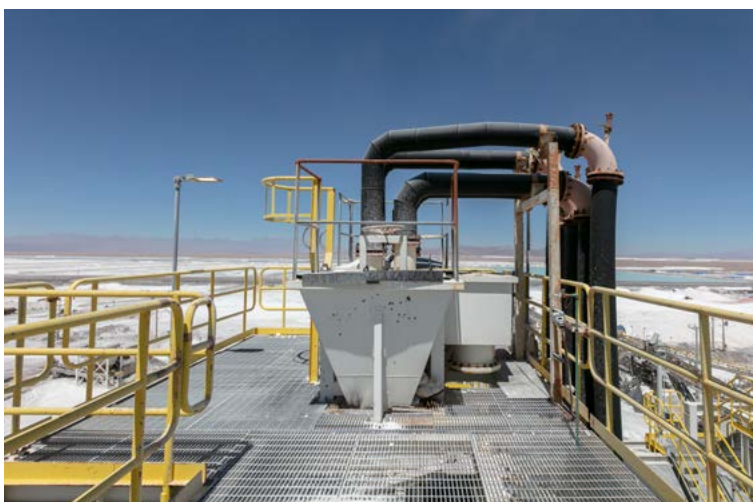
El desarrollo de cómo producir hidróxido de litio a partir de espodumeno se inició con el equipo de investigación e innovación de SQM Salar en Chile, en una planta piloto de 740 metros cuadrados que se construyó en 2019 en El Carmen para probar y validar el proceso que se va a hacer en Australia. Fue un proceso muy exigente, porque era totalmente nuevo para la empresa. Las muestras de espodumeno concentrado se enviaban desde Australia y en la planta piloto se calcinaba a altas temperaturas, se hacía una tostación y se le agregaba ácido sulfúrico y otros reactivos químicos para producir hidróxido de litio. Todas estas etapas fueron probadas y perfeccionadas a pequeña escala. A nivel local se generó el conocimiento para llevarlo a Australia y producir hidróxido de litio allá a partir de espodumeno.

Valor agregado al litio en Chile

El equipo de innovación y desarrollo de SQM también tiene entre sus obsesiones buscar maneras de desarrollar valor agregado al litio que produce la empresa en Chile. Uno de los proyectos más recientes es la creación de un ferrofosfato de litio nanoparticulado, que es uno de los pequeños componentes que tienen los electrodos de la batería. Antes de lanzarse a hacer baterías completas, que es algo que requiere más de 20 materiales de distintos lugares del mundo y donde es mucho más difícil competir con los grandes fabricantes chinos, coreanos y europeos, es más fácil comenzar por un pequeño componente para los electrodos, lograr credibilidad y confianza y a partir de ahí ver cómo seguir avanzando en la cadena de valor del litio.

El valor agregado se logra estudiando y desarrollando nuevos conocimientos. En China hay una universidad dedicada a estudiar el litio, pero en Chile casi no existe la minería no metálica en los planes de estudio. En la Universidad de Concepción hay un ramo electivo en la carrera de Ingeniería Civil en Metalúrgica. Y en el norte, hay profesores que hacen esfuerzos para estudiar el litio, pero no están conectados con la industria, porque, como reconoce Osvaldo Yáñez, es una industria muy cerrada, a la que le falta abrirse al conocimiento que pueden aportar las universidades y centros de estudio. Un caso de éxito ha sido el curso de litio impartido en la Universidad Católica del Norte, donde las clases las realiza un superintendente de producción de SQM. En este curso los estudiantes visitan las instalaciones en el Salar de Atacama. En 2021 el área de investigación e innovación empezó a buscar relaciones de colaboración con universidades locales y con cuatro de ellas formó alianzas estratégicas: Universidad Católica del Norte, Universidad de Antofagasta, Universidad de Concepción y Universidad Federico Santa María. Un objetivo es que cada año haya un cierto número de prácticas y proyectos de tesis trabajados con SQM, mediante un programa de becas financiado por la empresa. En el área de innovación y desarrollo han entrado más de 70 alumnos en práctica e inge-

En Australia, SQM producirá espodumeno desde la mina y está instalando su propia planta refinadora, proceso que tradicionalmente se ejecuta en China. Cuando la planta comience a funcionar en 2024, el valor agregado que aportará SQM en Australia será procesar localmente el mineral extraído y vender hidróxido de litio desde allí a los mercados de Asia y Europa.



nieros recién egresados que han comenzado a trabajar en el desarrollo de procesos nuevos y que han migrado a otras áreas o ascendido a cargos más altos. También se busca que profesionales de hidrogeología, operaciones, e innovación y desarrollo dicten charlas en universidades sobre problemáticas de la industria.

Y por último, está el sueño de ayudar a crear un postgrado en minería no metálica, que abarque el litio, el yodo, el potasio y el nitrato, para formar profesionales que den valor agregado a la industria en Chile. Uno de estos proyectos, junto con la Universidad Católica del Norte, es la creación de un polo de desarrollo en la cadena de valor de baterías de litio, que propone un plan hasta 2030 para financiar un centro de investigación de baterías y de desarrollo de capital humano, de un millón de dólares de inversión por parte de SQM. El objetivo es generar conocimiento respecto al litio y estudiar el diseño, producción y reciclaje de baterías y de partes de baterías de litio.

En suma, se trata de formar una cultura y un capital humano para potenciar el valor agregado del litio y eso requiere años de formación. Es una inversión a largo plazo a la que SQM está apostando.

Proyecciones futuristas

Conscientes de la historia del auge, caída y reinención de la industria del salitre y lo catastrófico que fue para Chile cuando surgió la competencia del salitre sintético, en SQM se están preparando para la posibilidad –lejana aún– de que el litio sea superado como componente estrella de las baterías. Podría ser reemplazado por otro elemento químico que comparta su capacidad de almacenar energía. O que aparezca algo similar a un litio sintético. Pero antes de que eso ocurra, van a producirse cambios importantes en la industria del litio relacionados con la tecnología de las baterías.

Actualmente las baterías tienen electrolitos líquidos, pero van a ir evolucionando a baterías semisólidas y, finalmente, a baterías sólidas, que van a necesitar litio metálico. Ya se están estudiando en la industria algunos prototipos de este tipo de baterías sólidas para autos eléctricos, que serán más seguras, con autonomía de 700 kilómetros y con una recarga mucho más rápida. Es una tecnología que probablemente sea una realidad hacia el final de la década. SQM se está preparando para esos futuros escenarios estudiando cómo producir cloruro de litio anhidro en polvo, porque el litio metálico se crea a partir del cloruro de litio.

Por lo demás, ya hay empresas investigando reemplazos posibles para el litio. CATL, la empresa china más grande en el mundo de producción de baterías, está diseñando una batería en base a sodio en vez de litio. El sodio es uno de los elementos más abundantes y baratos del mundo y posee propiedades relativamente similares al litio. Sin embargo, aunque son técnicamente factibles, las baterías de sodio todavía son poco eficientes y tienen baja capacidad de carga, algo que puede demorar 10, 15 o 20 años en solucionarse.

Incluso el potasio y el magnesio tienen potencial para un reemplazo tecnológico en las baterías. En la medida que el litio sube exponencialmente su precio y demanda, las investigaciones de baterías de sodio se vuelven mucho más interesantes para el rubro. Si ese avance tecnológico llega a tener éxito, es probable que en 2035, aproximadamente, una parte de las baterías van a ser producidas con litio y otra parte con sodio, que será muchísimo

más barato y cambiaría el paradigma del negocio y el tablero de competidores que podrían producir componentes para esas baterías.

Si la historia del salitre enseñó algo, es que no hay un mineral o tecnología que no pueda ser superada. El litio es un elemento estratégico para Chile y para el mundo, pero al igual que el salitre podría quedar obsoleto en algún momento. Por ahora, y al menos durante los próximos 10 a 20 años, la mejor alternativa para producir baterías de automóviles eléctricos seguirá siendo el litio. Por eso no conviene dejar este mineral guardado bajo tierra, porque la oportunidad de explotarlo, venderlo y crear una cadena de valor es ahora. Las oportunidades no duran para siempre.



La minería de litio en roca

Gabriel Valenzuela⁽¹⁾, David Torres⁽²⁾ y Norman Toro⁽³⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta 1270709, Chile.

⁽²⁾ Gerencia de operaciones Salar de Atacama, SQM, Antofagasta, Chile.

⁽³⁾ Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Arturo Prat, Iquique 1100000, Chile.

La minería del litio en roca se puede clasificar en dos tipos:

- Explotación minera en
ROCA DURA
rocas ígneas de pegmatita
- Explotación minera en
ROCAS BLANDAS
arcillas sedimentarias

La minería de litio en roca convencional es en “hard rock” o roca dura como es usualmente conocida, la cual ha tenido altos y bajos debido a los elevados costos respecto a los yacimientos de salmuera. Aún así, hay varios proyectos enfocados en minerales de litio que esperan reactivarse, debido a la importancia de los recursos de litio para hoy y el futuro.

FUENTES DE ROCA DONDE SE ENCUENTRAN LOS MINERALES DE LITIO

- Rocas ígneas, de tipo graníticas llamadas *pegmatitas*.

Las pegmatitas son rocas ígneas de granos muy gruesos, relacionados en compañía de grandes masas de rocas plutónicas (ígneas). Generalmente se encuentran en la naturaleza como diques, lentes o filones de mineralización, que en el caso del litio pueden ser micáceas con elementos acompañantes: (Be, Y, Ti, U, Th, Nb, Ta) o con tierras raras: (Rb, Cs, Be, Ra, Sn, Hf, Na, F, Y, Nb, Ta, Ti, U, Th, Zr). Usualmente, se han encontrado hasta más de 145 especies mineralógicas de litio en rocas pegmatitas, pero no todas son económicamente viables para una extracción minera.

Pegmatitas de roca dura y formación de cristales

Respecto a la formación de cristales masivos en extensión como lo son usualmente estos yacimientos, se explica que esta formación masiva es producida y favorecida por agentes volátiles (B, F, Cl y P) y presencia de flujos (H₂O líquido o vapor) en los procesos magmáticos. Estos elementos volátiles disminuyen la tasa de nucleación (se reduce el número de núcleos posibles para cristalizar de manera “independiente”) y aumentan la velocidad de difusión de los iones presentes, permitiendo la migración iónica a un retículo cristalino. Resultando en pocos cristales en cantidad pero de extensiones masivas, habiendo casos de hasta más de tres kilómetros de extensión como la mina Greenbushes en Australia (con dos kilómetros correspondientes a mineral de litio y el resto entre cesio y tantalio) hasta más de 300 metros de ancho. Y muestran una zonificación de

sus composiciones en distintos cuerpos cristalinos separados. En la naturaleza las rocas de granito tienen de manera frecuente pegmatitas asociadas por “genética”, las cuales presentan dimensiones no menores en el macizo rocoso, pudiéndose expresar en decímetros. En el caso de las micas, se han encontrado de hasta tres metros de espesor. La composición de una pegmatita y la existencia o no existencia de litio en ella, sigue siendo objeto de discusión debido a que las formaciones registradas son procesos muy complejos. Pero lo más aceptado hasta ahora es que probablemente se requirió un magma o fluido rocoso enriquecido en mineral que se mezclara con otros magmas. En conjunto con la acción metamórfica de la corteza terrestre se determina el contenido final de la pegmatita.

MINERALES DE LITIO EN ROCA DURA DE MAYOR RELEVANCIA ECONÓMICA

Los minerales de litio presentes en las rocas pegmatitas de granito, como menas de interés económico en roca dura son:

- Espodumeno
- Lepidolita
- Petalita
- Eucryptita
- Amblygonita

Espodumeno (LiAlSi₂O₆)

Es la mena mineral más común y viable económicamente de litio en roca en el mundo. El espodumeno es un mineral correspondiente a un inosilicato de litio. Los lugares donde se han encontrado depósitos de este mineral son: Suecia (Utö), Austria (Koralpe), Brasil (Minas Gerais), Argentina, Canadá (Manitoba, Quebec y territorios del noroeste), Zimbabue (Bikita), República Democrática del Congo (Manono y Kittolo), Australia (Greenbushes), Rusia (región de Chita) y República Popular China (montañas de Altai). El espodumeno es un mineral de color variable, puede estar cerca del blanco cuando hay baja o poca presencia de hierro o tomar un color verde oscuro al haber alta concentración de hierro. Cuando está limpio de estas impurezas es de calidad gema. Teóricamente el espodumeno contiene un 3,7% de litio, pero

la concentración varía de 1,35% a 3,56%, probablemente como resultado de la sustitución del litio por sodio y potasio. Se da en la naturaleza como cristales prismáticos con forma de listón, en granitos y pegmatitas a menudo entremezclados con cuarzo. Tiene un clivaje notablemente pronunciado y se descompone en la caolinita y montmorillonita cuando está a la intemperie. Su dureza en la escala de Mohs oscila entre los 6,5 - 7 y una densidad entre los 3,1 - 3,2 (kg/m³).



MINERAL
DE ESPODUMENO.

EL PROYECTO DE SQM EN AUSTRALIA: EL SALTO A LA MINERÍA EN ROCA

Mediante un *joint venture* con la entonces Kidman Resources, compañía que posteriormente sería adquirida por Wesfarmers Limited, SQM adquiere en 2018 el 50% de los derechos del proyecto de litio Mt. Holland, ubicado en el estado de Western Australia. El *joint venture* desarrollará una mina, una planta concentradora de espodumeno y una planta de refinería para procesar el concentrado proveniente de la mina.

Esta alianza tiene como objetivo inicial una vida útil de la mina de más de 40 años a una tasa de producción de 50.000 toneladas métricas de hidróxido de litio al año, con una recuperación prevista del 80% de espodumeno en su concentradora.

Se espera que en Mt. Holland se produzcan anualmente por sobre las 400.000 toneladas de concentrado de espodumeno para alimentar la refinería integrada de conversión de hidróxido de litio de la empresa ubicada en Kwinana, la primera planta de hidróxido de litio de Australia. Los procesos unitarios individuales en Kwinana comprenden secuencialmente desde calcinación, tostado con ácido, lixiviación, purificación y cristalización. En 2018, SQM y el gobierno de Australia definieron la ubicación de la planta refinadora de litio, al sur de la ciudad de Perth.

En diciembre del año 2020, SQM informó un plan de inversiones por US\$ 1.900 millones entre 2021 y 2024. Se anunció que estos recursos serían utilizados para ampliar la capacidad de producción de yodo, nutrientes vegetales de especialidad, y por supuesto, litio. Además, parte importante de estos recursos serán destinados a inversiones ambientales comprometidas por esta compañía.

En esta línea, SQM anunció el mismo mes un aumento de capital por US\$ 1.100 millones para financiar el histórico plan de inversiones, con un fuerte foco en el litio, en sus proyectos tanto en Chile como en Australia. Se espera que, de este monto, al menos US\$ 400 millones sean invertidos en Chile, particularmente en las operaciones que SQM tiene en Salar de Atacama y Planta de Químicos de litio El Carmen. Esta inversión en Chile busca llevar la producción de LCE a las 180.000 toneladas al año. Se debe tener en cuenta que hasta hace pocos años SQM no superaba las 48.000 toneladas de LCE al año.

A través de un hecho esencial enviado a la CMF (Comisión para el Mercado Financiero) en febrero de 2021, el directorio aprobó una gigantesca inversión para desarrollar el proyecto de litio Mt. Holland en Australia Occidental, *joint venture* que SQM tiene en partes iguales con Wesfarmers Limited. En base a la información provista en el estudio de factibilidad definitivo, se espera que la inversión en el proyecto durante los años 2021 y 2025 alcance los US\$ 700

millones (sujeto a variaciones por tipo de cambio). El estudio de factibilidad ha confirmado una capacidad inicial de producción del proyecto de 50.000 toneladas métricas de hidróxido de litio de grado batería. El proyecto contempla la compra de equipos principales y el comienzo de la construcción durante la segunda mitad de 2021, lo cual permitiría, conforme al estudio de factibilidad, que inicie su producción en la segunda mitad del año 2024.

Las razones que convencieron a SQM de invertir en este proyecto en Australia está en primer lugar en su tamaño y en su alta ley de litio, lo que permite pensar en expansiones futuras más allá de las 50.000 toneladas iniciales. La segunda razón es que, de acuerdo con sus estudios, el proyecto es muy competitivo en costos y, en tercer lugar, Australia es un país ideal para hacer un proyecto de estas características.

El director ejecutivo de SQM, Ricardo Ramos, dijo que Mt. Holland podrá satisfacer la demanda de vehículos eléctricos: "Seguimos confiando en las perspectivas del mercado del litio y creemos que Mt. Holland es un proyecto de alta calidad que desempeñará un papel importante en el apoyo al aumento de la demanda de baterías para vehículos eléctricos".

Las baterías del futuro

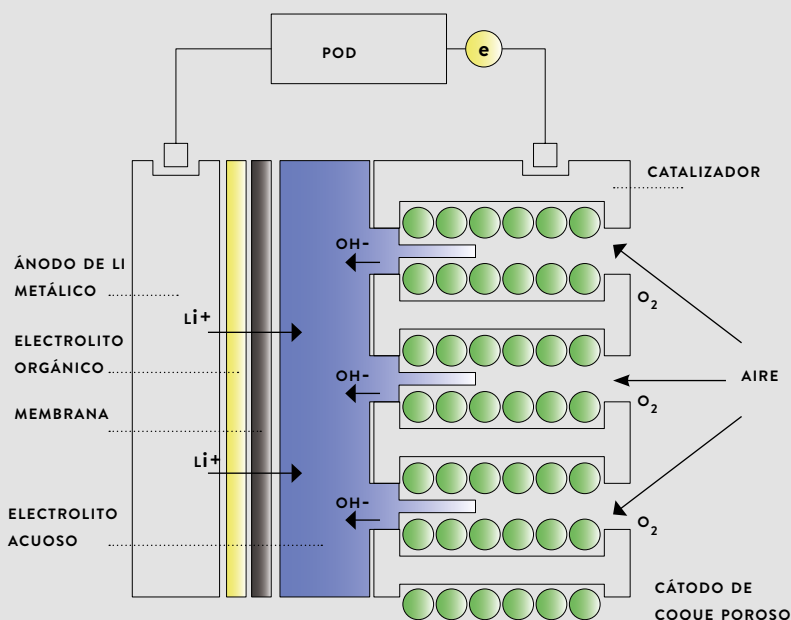
Los sistemas de baterías más comunes hoy en día son de iones de litio y ácido de plomo. Pero ambos sistemas tienen desafíos y limitaciones que claman por una mejor solución. La industria de las baterías está llena de promesas incumplidas, pero se están haciendo progresos.

Almacenar energía eléctrica de manera económica sigue siendo uno de los desafíos aún no resueltos en la sociedad moderna.

En términos de longevidad, se están haciendo avances en las baterías de iones de litio mediante el uso de material de cátodo de cristal único. Ganar una vida más larga y mantener una mayor capacidad es impulsado por la industria de vehículos eléctricos que se esfuerza por una vida útil de la batería de 15 años. Sin embargo, mientras los teléfonos celulares en el mercado de consumo usen tipos comunes de iones de litio que se carguen al voltaje máximo permitido, la vida útil será corta.

1. LITIO AIRE (LI-AIRE)

En 1970, se propuso por primera vez la batería litio aire sin mucho éxito. Sin embargo, en la década del 2000 esta tecnología ganó un renovado interés, en parte debido a los enormes y acelerados avances en la ciencia de los materiales, y al esfuerzo por encontrar una mejor batería para el tren motriz eléctrico. Esta batería proporciona una nueva y emocionante expectativa, porque promete almacenar mucha energía. Para su elaboración, se usa la idea del zinc-aire y la pila de combustible para hacer que la batería “respire” aire. La batería utiliza un cátodo de aire catalítico que suministra oxígeno, un electrolito y un ánodo de litio. Se puede decir que la idea es muy sencilla, pero revolucionaria. Las baterías litio aire tienen como principal característica su gran densidad energética, pero tienen baja eficiencia en sus ciclos de carga y descarga.



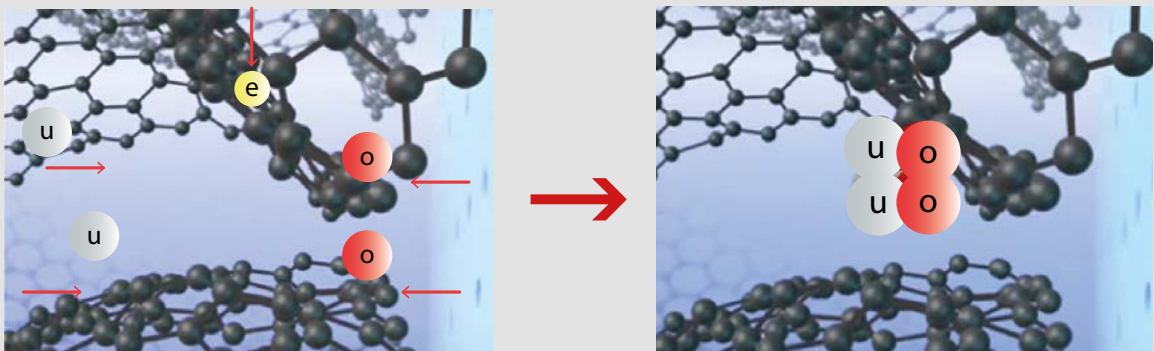
Esquema de una batería litio aire.

Al igual que en una batería convencional de ion litio, el litio pasa a través del electrolito y llega hasta el coque poroso. A su vez, el oxígeno ingresa a la batería y los electrones por la parte superior a través de una fuente de poder externa. Posteriormente, estos elementos se juntan formando Li_2O_2 .

Las baterías de litio aire pertenecen a la familia de las baterías metal-aire, en donde la Li-aire es la que presenta la mayor densidad de energía teórica. La energía específica teórica del litio aire es de 13 kWh/kg. Si esta energía pudiera ser entregada, la tecnología litio aire estaría a la par con la gasolina a aproximadamente 13 kWh/kg. Pero incluso si el producto final fuera solo una cuarta parte de la densidad de energía teórica, el motor eléctrico con una eficiencia

superior al 90% compensaría su menor capacidad contra el motor de combustión interna, con una eficiencia térmica de solo 25-30%.

Para este tipo de baterías, la compañía Tesla Motors tiene una propuesta interesante. La idea es utilizar la batería de ion litio para tramos cortos de desplazamientos, como se hace a diario en la ciudad, pero con baterías más pequeñas. Y para los tramos más largos, se utilizaría la batería de litio aire que iría recargando a la de ion litio. De esta forma se reduciría el tamaño, y por tanto el peso, de las baterías de ion litio actuales lo que permitiría incluir una segunda batería de litio aire.



Esquema interno en el ánodo de coque para la formación de Li_2O_2 .

Fuerza electromotriz teórica y densidad de energía teórica de varias baterías de metal-aire.

Batería metal-aire	Automotriz teórica	Densidad de energía teórica (Wh/kg)*	Capacidad teórica (mAh/g)
Litio aire	2,91	11.140	3.828
Sodio-aire	1,94	2.260	1.165
Calcio-aire	3,12	4.180	1.340
Magnesio-aire	2,93	6.462	2.200
Aluminio-aire	2,7	4.021	1.490
Hierro-aire	1,32	1.584	1.200

* Densidad de energía sin oxígeno.

Principales desafíos a superar

Al igual que en otras baterías que respiran aire, la potencia específica puede ser baja, especialmente a bajas temperaturas. Otro desafío muy importante es la pureza del aire, ya que el aire que respiramos en nuestras ciudades no es lo suficientemente limpio para el litio aire y necesitaría ser filtrado. Por lo que sabemos, la batería puede terminar con compresores, bombas y filtros que se asemejan a una celda de combustible, consumiendo el 30% de su energía producida para que el soporte auxiliar se mantenga con vida.

Otro problema es el síndrome de muerte súbita. El litio y el oxígeno forman películas de peróxido de litio que producen una barrera que impide el movimiento de los electrones y produce una reducción abrupta de la capacidad de almacenamiento de la batería. Los científicos están experimentando con aditivos para evitar la formación de películas. El ciclo de vida también tendrá que mejorar. Las pruebas de laboratorio actualmente producen solo 50 ciclos.

2. LITIO AZUFRE (LI-S)

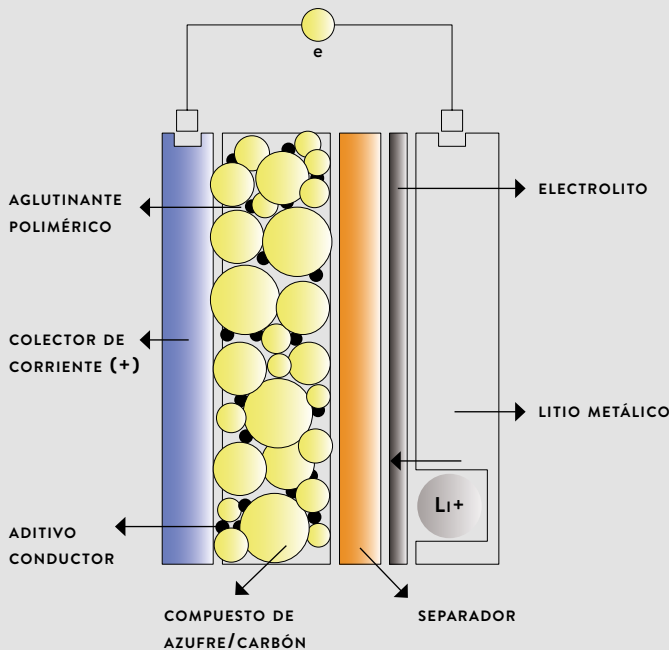
La investigación y el desarrollo de electrodos de azufre comenzaron en 1960-1970. En base al bajo peso atómico del litio y el moderado peso atómico del azufre, las baterías de litio azufre ofrecen una energía específica muy alta de 550 Wh/kg, aproximadamente tres veces la del ion de litio, y también tienen una potencia específica respetable de 2.500 W/kg. Otra gran ventaja es la abundancia y bajo costo del azufre.

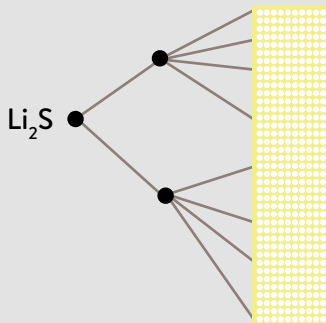
Durante la descarga, el litio se disuelve de la superficie del ánodo y se revierte cuando se carga al recubrirlo nuevamente con el ánodo. Li-S tiene un voltaje de celda de 2,10 V, ofrece buenas características de descarga a temperatura fría y puede recargarse a -60°C.

Respecto a su funcionamiento, a diferencia de las baterías ion litio convencionales, las baterías de litio azufre reemplazan el coque por litio metálico, un catalizador que proporciona doble servicio como electrodo y proveedor de iones de litio. La batería de litio azufre elimina el “peso muerto” al reemplazar el cátodo de óxido de metal utilizado en un ion de litio con azufre más barato y más ligero. El azufre tiene la ventaja adicional de reservar dos átomos de litio, algo que el ion de litio no puede hacer.

En los cátodos compuestos de azufre-carbono, los materiales de carbono cumplen múltiples funciones:

- La conversión electroquímica de las especies de azufre se realiza mediante transferencia de carga en la superficie conductora de carbono.
- Los materiales de carbono, soportados por el aglutinante, forman un andamio poroso y conductor que proporciona volumen libre para la absorción de azufre y electrolito.
- Este andamio proporciona estabilidad mecánica para soportar los cambios de volumen, así como las reacciones de disolución y precipitación de las especies de azufre durante la carga y descarga de la batería.
- A través de su morfología o propiedades químicas de la superficie, el andamio de aglutinante de carbono afecta aún más la retención de polisulfuro, lo que dificulta el transporte masivo de polisulfuros al ánodo.





Esquema de cómo se forma Li_2S en el cátodo de azufre poroso.

Principales desafíos

La dificultad en la batería Li-S que funciona a temperatura ambiente radica en dos puntos: la conductividad y la solubilidad de los polisulfuros parcialmente litados, Li_xS_8 . El polvo S es generalmente un polvo amarillo y tiene poca conductividad. Por lo tanto, se debe garantizar la vía de conducción. Este polisulfuro Li_xS_8 se forma durante la descarga y la carga de la batería y sufre una reacción electroquímica en la fase líquida en el disolvente orgánico. Esto provoca una peor eficiencia y una pobre capacidad de ciclo.

La estrategia de I + D reciente de Li-S se clasifica de la siguiente manera:

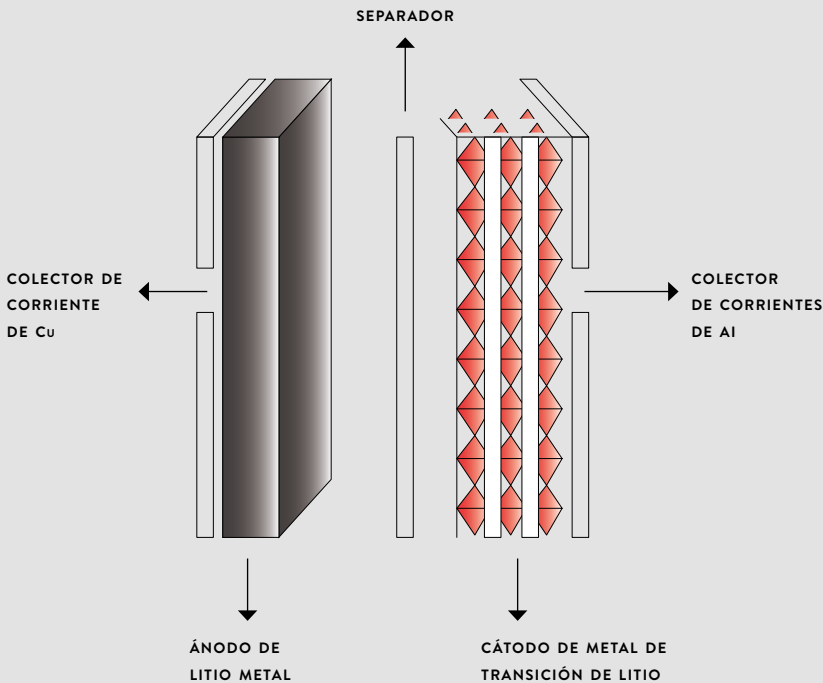
- Compuesto de metal y azufre
- Compuesto de carbono y S o Li_2S
- Investigación del electrolito
- Protección del electrodo de Li
- Compuesto orgánico que contiene S

3. LITIO-MANGANESO-HIERRO-FOSFATO ($\text{LiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{PO}_4$) – (LMFP)

Se dice que el litio-manganeso-hierro-fosfato aumenta la capacidad hasta en un 15% sobre el sistema regular litio-ferrofosfato (LiFePO_4). El voltaje de trabajo promedio es de 4 V, la energía específica es de 135 Wh/kg y se dice que un ciclo de vida es de 5.000. La alta resistividad del LiMnPO_4 impidió su comercialización. Mientras que el LiFePO_4 ha alcanzado un gran éxito, sobre la solución sólida $\text{LiMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{PO}_4$ se han realizado investigaciones para aprovechar tanto el aumento de la conductividad aportada por el hierro como la mayor densidad de energía aportada por el manganeso. Se han conseguido buenos resultados cuando la concentración de manganeso no excede 0,8. Si se compara respecto a sus antecesores, la batería LMFP tiene mejor estabilidad de ciclo que la LiMn_2O_4 , y mejor adaptación de voltaje que la LiFePO_4 . Por lo tanto, una estrategia prometedora es ajustar el comportamiento electroquímico combinando LMFP con otros materiales catódicos, por ejemplo, $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ (NMC). Los cátodos mezclados pueden permitir que los materiales del cátodo padre se complementen entre sí y demuestren un mejor rendimiento.

4. LITIO METAL (LI-METAL)

El litio metal ha sido visto durante mucho tiempo como la batería recargable futura debido a su capacidad específica teórica ultra alta (3.860 mAh/g) y un potencial redox muy bajo (-3,04 V versus electrodo de hidrógeno estándar). Sin embargo, la deposición de litio no controlada causa un crecimiento de dendrita que induce riesgos de seguridad al penetrar en el separador y producir un cortocircuito eléctrico. Encontrar una solución para inhibir el crecimiento de la dendrita puede ser inminente. Para producir depósitos sin dendrita en las baterías de Li-metal, se están realizando pruebas agregando nanodiamantes como aditivo electrolítico. Esto funciona según el principio de que el litio prefiere absorberse en la superficie de un diamante, lo que genera un depósito uniforme y un mejor rendimiento de ciclismo. Las pruebas han demostrado ciclos estables durante 200 horas, pero esto no proporcionaría garantía suficiente para aplicaciones de consumo como teléfonos móviles y computadoras portátiles. Junto con el trabajo de investigación, las baterías de metal de litio pueden necesitar otras precauciones, incluidos electrolitos no inflamables, materiales de electrodos más seguros y separadores más fuertes.



Esquema de una batería litio metal.

Principales desafíos

Varios obstáculos restantes deben superarse antes de la aplicación práctica de los ánodos de metal de Li en baterías recargables de metal de Li.

- El crecimiento incontrolable de dendrita de Li da como resultado graves problemas de seguridad.
 - La inestabilidad termodinámica del litio metal debido a su alto nivel de energía Fermi puede causar reacciones irreversibles y continuas entre el litio y el electrolito, que generan capas gruesas en la interfase de electrolito sólido (IES) en la superficie del litio metal, consumen litio y electrolito y aumentan resistencia interna, acortando así la vida del ciclo.
 - Pueden ocurrir grandes cambios volumétricos y morfológicos en el ánodo de litio metal durante los procesos repetidos de recubrimiento y decapado. Pero las películas IES mencionadas son demasiado frágiles para suprimir por completo estos cambios significativos en el electrodo de litio metal.
- Después de varios intentos fallidos de comercializar baterías recargables de litio metal, continúa la investigación y la fabricación limitada de esta batería. Aunque las baterías de metal de litio pasaron las estrictas pruebas de aprobación, la seguridad a largo plazo sigue siendo un problema porque se pueden formar filamentos metálicos que pueden causar un cortocircuito eléctrico.

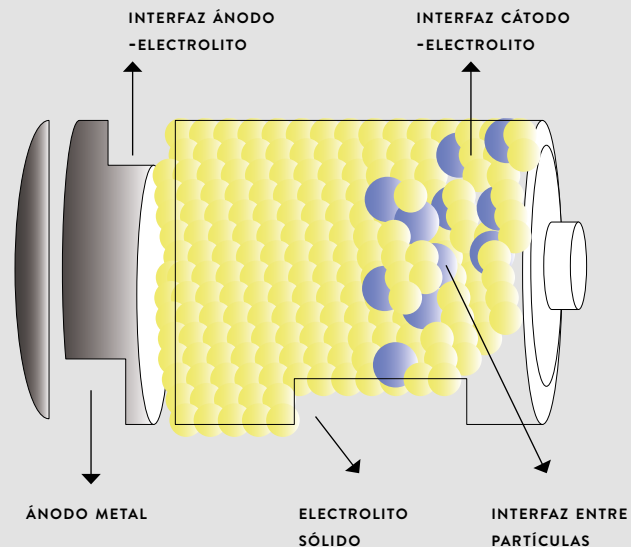
5. LITIO DE ESTADO SÓLIDO

La batería de litio de estado sólido se diferencia de la batería de ion litio convencional, porque reemplaza el ánodo de coque con litio puro, y además sustituye el electrolito líquido empapado en un separador poroso con un polímero sólido o un separador de cerámica.

El sistema de litio de estado sólido produce muchas ventajas interesantes:

- Alivia las preocupaciones de seguridad al abandonar el uso de electrolitos líquidos orgánicos inflamables.
- Puede prevenir cortocircuitos al bloquear las dendritas de litio en un lado.
- Algunas baterías en estado sólido pueden doblarse o incluso perforarse sin correr riesgos de seguridad no deseados.
- El electrolito sólido estable facilita potencialmente una ventana electroquímica más amplia, permitiendo así el uso de ciertos materiales de cátodo con mayor capacidad de voltaje.

Estas baterías tienen el doble de capacidad que las mejores baterías actuales de iones de litio lo que, a igualdad de peso, les da el potencial de duplicar la autonomía de los vehículos eléctricos que las implementen.



Esquema de una batería de litio de estado sólido.

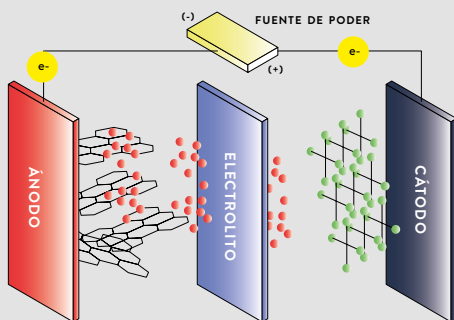
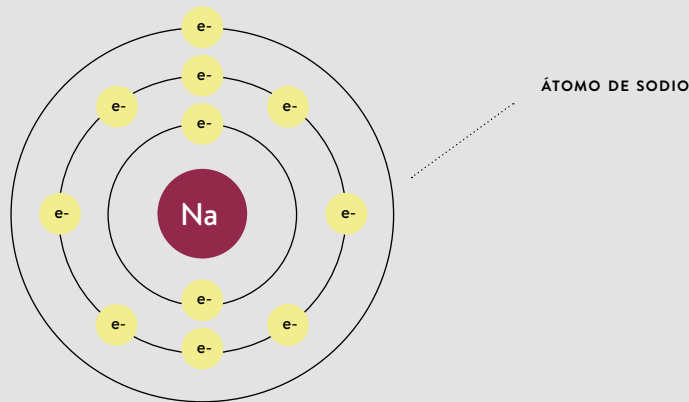
Principales desafíos

La batería de litio de estado sólido comparte similitud con la batería litio metal y los científicos están tratando de superar el problema de la formación de filamentos metálicos (dendrita) incluso con polímeros secos y separadores de cerámica. Los desafíos adicionales son poca conductividad a temperaturas frías, dificultad para diagnosticar problemas dentro de la celda y bajo recuento de ciclos. Se dice que los prototipos de estado sólido solo alcanzan los 100 ciclos.

Las baterías de estado sólido prometen almacenar el doble de energía en comparación con el ion de litio normal, pero las capacidades de carga pueden ser bajas, lo que las hace menos adecuadas para trenes de potencia eléctricos y aplicaciones que requieren altas corrientes. Las aplicaciones específicas son la nivelación de carga para la fuente de energía renovable, así como los vehículos eléctricos, aprovechando los cortos tiempos de carga que permite esta batería.

6. ION-SODIO (NA-ION)

Un átomo de sodio (Na) tiene un número atómico de 11. Posee 11 electrones y 11 protones. El sodio es un metal alcalino, como el litio, y su química es muy similar, hasta el momento sus prestaciones no son tan elevadas como las de las baterías de ion litio. Sin embargo, es una buena opción a tener en cuenta, y son muchos los grupos de investigación y empresas buscando la receta adecuada. En cuanto a su funcionamiento, son bastante similares a las de ion litio, teniendo diferencias en su ánodo de coque. El ion de sodio representa una posible alternativa de menor costo al ion de litio, ya que el sodio es económico y está fácilmente disponible (el sodio es el metal alcalino más común y el sexto elemento más abundante en la tierra). Dejado de lado a fines de la década de 1980 a favor del litio, el ion de Na tiene la ventaja de que puede descargarse por completo sin encontrar tensiones comunes con otros sistemas de baterías. La batería también se puede enviar sin tener que cumplir con las regulaciones de mercancías peligrosas. Algunas celdas tienen 3,6 V y la energía específica es de aproximadamente 90 Wh/kg con un costo por kWh similar a la batería de plomo ácido.



Esquema de una batería ion sodio.

Principales desafíos

Las baterías de ion sodio presentan problemas que aún no se han resuelto, por lo cual están por debajo de las de ion litio en el mercado. Los principales desafíos son los siguientes:

- No son capaces de mantener la carga durante muchos ciclos, perdiendo hasta un 50% después de 50 ciclos, mientras que una de ion litio puede soportar 300 ciclos completos sin llegar a perder ese 50%.
- Se debe resolver la gran expansión volumétrica que experimenta al estar completamente cargada.
- El sodio tiene un radio iónico un 70% más grande que el del litio, lo cual hace más difícil encontrar materiales en los que insertar y posteriormente extraer el ion de sodio. Se necesitan estructuras abiertas y materiales que no generen reacciones secundarias.

Como se puede apreciar en la información previamente descrita sobre las diferentes baterías que se están investigando, los avances son muy acelerados gracias a la comprensión de la química a gran profundidad y los recientes descubrimientos en la ciencia de los materiales.

Resumen de las baterías futuras más comunes.

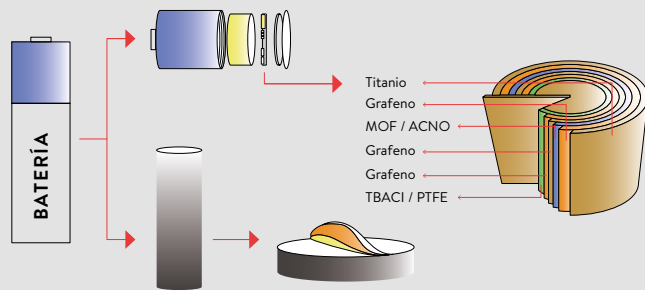
	Litio aire	Litio azufre	Litio de estado sólido	Litio metal	Ion-sodio
Tipo	Cátodo de aire con ánodo de litio	Ánodo de litio; cátodo de azufre	Ánodo de litio; separador de polímeros	Ánodo de litio; cátodo de grafito	Ánodo de carbono; cátodos diversos
Voltaje por celda (V)	1,7 – 3,2	2,1	3,6	3,6	3,6
Energía específica (Wh/kg)	13.000 (teórica)	500 (o menos)	300 (estimado)	300	90
Carga	Desconocida	0,2 C (5h)	Carga rápida	Carga rápida	Desconocida
Descarga	Baja potencia; inferior cuando hace frío	Alta potencia (2.500 W/kg)	Mala conductividad cuando hace frío	Banda de alta potencia	Desconocida
Ciclo de vida	50 ciclos en laboratorios	50, disputado	100, prototipos	2.500	50 típica
Empaque	No definido	No definido	Prismático	No definido	No definido
Seguridad	Desconocida	Circuito de protección requerido	Necesita mejorar	Necesita mejorar	Segura
Historia	Comenzó en la década de 1970; renovado interés en la década de 2000. I + D por IBM MIT, UC, etc.	Nueva tecnología; I + D por Oxis Energy, Bosch y otros	Similar al polímero de litio que comenzó en 1970	Producido en la década de 1980 por Moli Energy; se retiró por seguridad	Ignorado en la década de 1980 a favor de litio; ha renovado interés
Problemas a mejorar	La película de peróxido de litio detiene el movimiento de electrones con el uso. La impureza del aire causa daños	El azufre se degrada con los ciclos; inestable cuando hace calor, mala conductividad	El crecimiento de la dendrita provoca cortocircuito eléctrico; bajo rendimiento a baja temperatura	El crecimiento de la dendrita causa cortocircuito eléctrico con el uso	Poca investigación en esta área
Aplicaciones	No definida; potencial para vehículos eléctricos	Vuelo en avión con energía solar en agosto de 2008	Sistemas de almacenamiento de energía, vehículos eléctricos	Vehículos eléctricos, usos industriales y tecnología portátil	Almacén de energía
Comentarios	Tomado del concepto de “respirar” zinc-aire y pila de combustible	Puede tener éxito sobre las ion litio debido a un menor costo y mayor capacidad	Similar al litio metal, podría estar lista para vehículos eléctricos en 2025	Buena capacidad, carga rápida y alta potencia mantienen el interés alto	Bajo costo a la par con ácido de plomo. Se puede descargar completamente

DIAMANTE “NUCLEAR”

Las baterías de diamante son una propuesta de la *startup* californiana Nano Diamond Battery (NDB). Esta tecnología comenzó su desarrollo en 2012 y ya cuenta con un prototipo llamado Diamond Nuclear Voltaic, cuya aparición en el mercado se espera próximamente. Estas baterías son fabricadas en base a desechos nucleares, de los que existen 300.000 toneladas en el mundo y nadie sabe qué hacer con ellos. Es una batería voltaica de alta potencia basada en diamantes alfa, beta y neutrones que, según sus creadores (NDB), puede proporcionar a los dispositivos “energía verde de por vida”. Esto debido a que promete durar ¡28.000 años! Y una autonomía sin necesidad de recargas de 90 años.

¿Cómo funciona?

Componentes de grafito radiactivo residuales de reactores nucleares son calentados, el carbono radiactivo (carbono 14) se convierte en gas y se comprime a alta presión hasta formar diamantes artificiales. Estos diamantes “nucleares” pueden suministrar electricidad y se pueden utilizar para baterías de cualquier formato y tamaño. En la imagen, se muestra que comprende dos componentes principales, en su parte superior tiene una placa de circuito integrado y un supercondensador, compuesto por metales como titanio, grafeno, estructuras metal-orgánicas (MOF)/nanoanillos de carbono activado (ACNO) y cloruro tetrabutilamonio/politetrafluoroetileno. Su parte inferior está compuesta por nanocapas de diamante.



Estructura de una nano batería NDB



Batería NDB

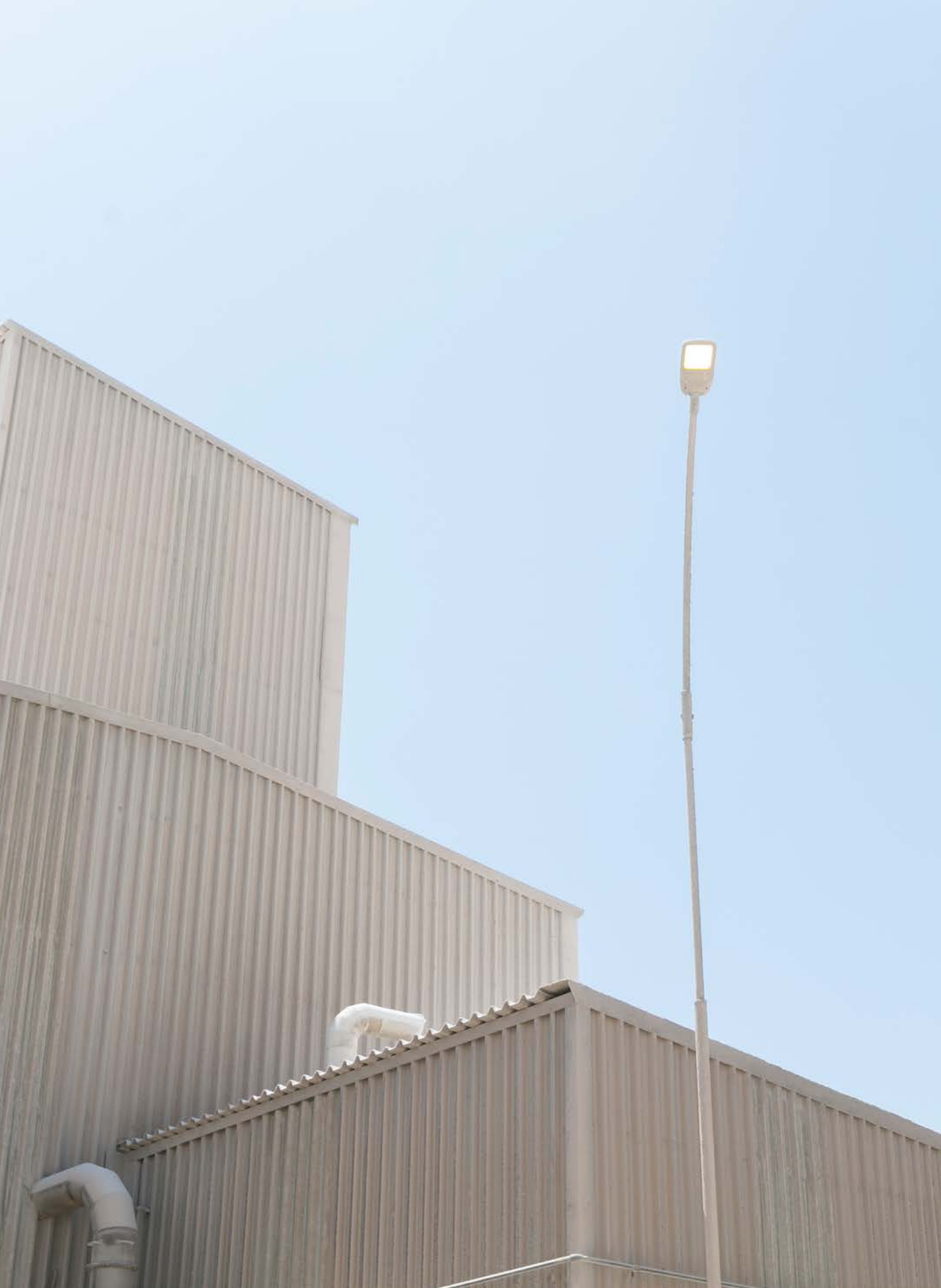
¿Por qué diamantes?

El diamante es uno de los minerales de más alto valor económico en el mundo debido a sus características físicas y ópticas. En general, tiene la más alta dureza y es utilizado industrialmente en herramientas de corte y pulido. Además, posee la más alta conductividad térmica, lo que lo vuelve inusual en la construcción de dispositivos. Los diamantes monocristalinos de tamaño micro alejan el calor de los materiales de isótopos radiactivos con tanta rapidez que la operación genera electricidad.

Principales desafíos

- Producen una décima parte de la energía que genera una batería convencional de ion litio.
- Aunque en pequeña cantidad, tienen radiactividad. Las fugas se deben evitar a toda costa.
- Deben tener un muy buen sistema de rastreo y monitoreo, ya que pueden ser peligrosas si se les da un mal uso o si son desechadas en lugares no adecuados. Todo indica que estas baterías son una alternativa idónea para aparatos en que es complicado cambiar la fuente de energía, como marcapasos, satélites y cohetes.

Los sistemas de baterías más comunes hoy en día son de iones de litio y ácido de plomo. Sin embargo, se están investigando posibles “baterías del futuro” que compitan por su rol dominante, como las baterías de litio aire, litio azufre, litio en estado sólido, litio metal, ion-sodio y diamante nuclear. Aunque quedan desafíos por resolver en estas nuevas tecnologías, los avances son muy acelerados, gracias a la comprensión de la química a gran profundidad y a los recientes descubrimientos en la ciencia de los materiales.



El regreso al mercado chino

Un factor importante de la gran crisis que sufrió SQM Salar en 2018, cuando se quedaron con un 30% del litio sin vender, fue que no tenían una fuerza de ventas bien posicionada en los mercados asiáticos, que eran los de mayor crecimiento en electromovilidad. El equipo de ventas de SQM en Asia Pacífico era de una persona en Japón y una persona en China, nada más. Comercialmente tenían un enorme desafío: recuperar clientes en un mercado que estaba con sobreoferta, con precios bajos y donde además no llegaban a la calidad requerida.

Pablo Altimiras, recién nombrado vicepresidente senior de negocios litio y yodo, y Felipe Smith, jefe de ventas de Asia Pacífico, viajaron a la República Popular China con la urgente misión de reconquistar a sus antiguos clientes de la industria de cátodos, que aún estaban agraviados porque SQM se había retirado del mercado chino. Había sido una decisión tomada hacía unos años porque la planta de SQM estaba restringida en capacidad y les dieron prioridad a los clientes de Corea, Japón y Europa, que ofrecían mejores precios. Esto fue mal recibido por los clientes de China, cuya cultura empresarial le da un alto valor a la lealtad. La decisión le costó caro a SQM, que quedó desfasada de los avances de la industria en China, que ahora imponía el estándar de calidad del litio en el mundo.

Recobrar la credibilidad de los clientes chinos fue una odisea. Requirió volver a generar vínculos, demostrarles que el regreso al país era permanente, que el objetivo era crear colaboraciones duraderas y no solo un movimiento de corto plazo. Para demostrar la seriedad de sus intenciones de quedarse, reforzaron la fuerza de ventas de SQM en China con cuatro ejecutivos comerciales y una nueva área de coordinación y logística.

Después de varios meses de conversaciones, el primer cliente que lograron recuperar en China fue un productor de cátodos con el que negociaron un contrato grande de carbonato de litio. Felipe Smith y Pablo Altimiras viajaron a cerrar formalmente la propuesta y entregaron un precio muy atractivo de venta, para convencerlos. Los clientes quedaron sa-

tisfechos y los invitaron a una comida de celebración con brindis de licor de arroz, ya que en la cultura de negocios oriental una comida bien regada es el primer paso para ser alguien digno de confianza y el último para sellar un contrato nuevo. Podía tomar varias reuniones vencer las reticencias, pero una vez que el cliente decía “hagamos negocio” y ofrecía un apretón de manos, el acuerdo se respetaba con honores y podía proyectarse por décadas. Por supuesto, esa fidelidad tenía que ser retribuida cumpliendo sagradamente con los plazos y calidades prometidas.

La misión de volver a China y ganar antiguos y nuevos clientes se logró en dos años. Actualmente es el mayor mercado de SQM Salar.

Una fuerza de químicos para la fuerza de ventas

El otro gran desafío que tenía SQM, no solo en Asia sino también en los mercados de Estados Unidos y la Unión Europea, era mejorar la gestión técnica de los clientes de electromovilidad, muy distintos a los clientes industriales tradicionales a los que estaban acostumbrados los ejecutivos de venta. Esta gestión incluía el conocimiento profundo de los productos en este nuevo mercado para que SQM pudiera comprometer características o especificaciones de los productos, y también para atender las consultas y reclamos de los clientes. La fuerza comercial de la empresa era transaccional, se dedicaba principalmente a negociar precios y cantidades. Era un equipo de buenos vendedores, pero no tenía el suficiente conocimiento ni soporte técnico para negociar especificaciones. Esta limitación causaba fricciones y falta de alineamiento con el área productiva, ya que cuando se hacía una solicitud de cambio de alguna característica que tenía un impacto productivo inicialmente negativo, como disminuir el contenido de sodio, lo que implicaba ciertos cambios en la operación, el impacto comercial no estaba claro porque no se entendía la real necesidad del cliente de un menor contenido de sodio. Era necesario fortalecer al equipo con gente que viniera del mundo de las baterías y los cátodos para realmente entender para qué se usaban los productos, en qué etapa del proceso del cliente se utiliza el litio, a qué temperatura se trabaja y porqué. Ya que esta es una



El laboratorio de desarrollos analíticos de SQM investiga y diseña junto al cliente el método de medición químico o físico de las especificaciones requeridas y los equipos que se emplearán. Una vez que el método está aprobado, viene la ejecución, que queda a cargo de los laboratoristas de la Planta de Químicos de litio El Carmen, quienes empiezan a medir con los nuevos parámetros.



industria que está cambiando todo el tiempo sus especificaciones para mejorar su tecnología, en SQM Salar ya no bastaba con tener conocimiento técnico solo a nivel productivo, había que incorporar esa información a nivel comercial. Era la única manera de poder anticipar las especificaciones técnicas que los clientes van a necesitar en el corto y largo plazo.

Fue un cambio de mentalidad en la manera de mirar el negocio: entender que el carbonato y el hidróxido de litio grado batería son productos químicos complejos, de alto valor agregado, que requieren una constante actualización comercial para entender a los clientes y producir y vender el producto que necesitan.

El área de calidad incorporó en 2019 a su rol de aseguramiento de calidad, que tenía foco en las operaciones de la casa matriz, la gestión técnica de producto y se creó un departamento de gestión de producto, dedicado a atender las necesidades técnicas de los clientes. También se creó un departamento de coordinación de ventas y logística, necesario para manejar los crecientes volúmenes de despachos a los distintos puertos asiáticos. La fuerza de ventas en China se reforzó con cuatro personas; en Japón, con dos personas, y en Corea, con una persona. Adicionalmente, el área comercial de SQM cuenta con un equipo de químicos en su casa matriz de Santiago, en Antofagasta y también en Asia, que dan soporte a la fuerza de venta. Se han preocupado de generar capacitaciones para que se sientan cómodos hablando de especificaciones técnicas con los clientes y respaldados con una mejor atención de las necesidades de los fabricantes de cátodos y baterías.

Una de las medidas más importantes para estar más cerca de los clientes fue reclutar a dos ingenieros químicos provenientes de la industria de cátodos en China y de baterías en Corea. Después de una búsqueda con *headhunters*, en China contrataron a Nick Zhang, que había trabajado como ingeniero de desarrollo en empresas que fabrican material de cátodos. En Seúl seleccionaron a Jong Park, que tenía experiencia en aseguramiento de calidad para uno de los principales fabricantes de baterías de ese país. Ambos fueron contratados en abril de 2020 para integrarse al equipo co-

A principios de 2020 el área de calidad se separó en dos y se creó un nuevo departamento de *technical product management*, dedicado a atender las necesidades técnicas de los clientes, y un departamento de coordinación de ventas y logística, necesario para manejar los crecientes volúmenes de despachos a los distintos puertos asiáticos.

mercial como *technical product managers*. Una de las primeras instrucciones que les dio Pablo Altimiras a Zhang y Park fue que se mantuvieran muy cerca de los gerentes de investigación y desarrollo de productos de los clientes de SQM.

Ya tenían como antecedente un informe de mayo de 2019, en el que se había levantado con los clientes de baterías de distintos segmentos toda la información de especificaciones de productos que no conocían y su primer entendimiento, y a partir de él se generó un mapa de ruta de calidad de productos de litio. Jong Park y Nick Zhang llegaron a consolidar esta información y a ampliarla y proyectarla, además de generar un vínculo de cercanía permanente con los clientes.

Gracias a este esfuerzo, se logró corroborar que los niveles de impurezas para las otras materias primas de baterías no eran tan exigentes como las de productos de litio, y que los requerimientos para estos tenían que ver con que se agregan al final del proceso de producción de un material de cátodo. Por el contrario, las materias primas de cobalto o níquel que se utilizan en la fabricación de baterías tienen procesos de remoción de impurezas relativamente sencillos o impurezas que no afectan el desempeño de un material de cátodo. Informaciones sobre el proceso del cátodo tan importantes como estas antes no las sabían y empezaron a conocerlas permitió anticipar las calidades que se necesitan, negociar mejor con los clientes y planificar con tiempo las mejoras que requerían las plantas.

El rol de Zhang y Park no se limitaba al conocimiento técnico de los procesos de clientes. Cuando llegaba algún reclamo de clientes en China o Corea, se trasladaban a sus oficinas para entender a cabalidad el problema. Después traspasaban la información a la casa matriz en Chile, para proceder a una investigación del problema acusado o de la consulta, de acuerdo a los estándares de la industria de la electromovilidad. Gracias a ese puente se ha logrado un acercamiento con los clientes que antes no existía. Zhang y Park no solo tenían la ventaja de compartir el mismo país e idioma, sino también el lenguaje técnico de los clientes, facilitado por su experiencia previa en las industrias de baterías y cátodos.



El área comercial de SQM tiene una fuerza de venta en su casa matriz de Santiago y en Asia, que participa en capacitaciones para dominar las especificaciones técnicas de los productos y comprender las necesidades de los fabricantes de cátodos y baterías, y los procesos productivos en el Salar de Atacama y las plantas de El Carmen.

Tener a personas con el conocimiento técnico para entender los problemas de los clientes facilitó dar soluciones rápidas. Antes, los clientes se enfurecían con justificada razón porque hacían un reclamo de calidad y en SQM se demoraban más de un mes en enviar las preguntas y hacer la investigación en los laboratorios de El Carmen. Ahora, en cambio, el área de calidad de SQM tiene un laboratorio en China y cuando hay un problema de calidad, se toma una muestra y se analiza inmediatamente allá.

Tanto Jong Park en Corea como Nick Zhang en China se enfocaron en acortar los tiempos de respuesta de SQM a máximo diez días y en coordinar soluciones rápidas cuando era posible. A comienzos de 2020 SQM tenía cuatro clientes en China y en 2022 ya tenía 20.

Otro rol importante que cumplen es aprovechar sus conversaciones con los clientes para entender cuáles son las necesidades y tendencias del mercado en el futuro próximo. Zhang y Park no tardan en enterarse de las nuevas exigencias que los productores de baterías les piden a los fabricantes de cátodos porque visitan a sus clientes clave dos o tres veces al año y hablan por teléfono frecuentemente con ellos.

Esta información la sistematizan cada año en un documento sobre los requerimientos técnicos de todos los productos pedidos por los clientes, su proceso de producción y los estándares de calidad presentes y futuros. Incluyen también los métodos de medición para ciertos parámetros críticos y algunas pruebas que los clientes piden que estén incluidos en los certificados de productos.

Esos valiosísimos datos recolectados por los *technical managers* se complementan con las investigaciones de tendencias del mercado de baterías de iones de litio de la doctora en ingeniería civil Verónica Gautier para el área de innovación de SQM. Gracias a todo esto, la empresa hoy cuenta con una cantidad sustancial de inteligencia de negocios para entender a dónde va el mercado. Después de dos años el trabajo alineado de estos equipos ha logrado tener una muy buena base de datos que permite identificar los problemas de los clientes y decidir con tiempo futuras inversiones, calidades y la planificación estratégica del aumento de producción.

La información recolectada por esta nueva inteligencia de negocios permitió generar una agenda específica para definir el conjunto de atributos que debía tener el carbonato y el hidróxido de litio en los próximos meses y años para posicionar los productos de la empresa en esos mercados. Esa información de calidad permitió a Beatriz Oelckers, doctora en química y entonces directora de calidad y productos de litio y yodo, convencer a la plana ejecutiva de SQM en 2020 de que si seguían teniendo 500 partes por billón de partículas magnéticas, nadie les compraría litio, porque la industria no transa ese parámetro por motivos de seguridad. De hecho, la tendencia que ve el área de *product management* y calidad de SQM es que en 2025 ese parámetro va a estar en 50 ppb y en los años siguientes bajará a 25 o 30 ppb. Mientras más poderosas se vuelven las baterías, más sensibles se vuelven a la presencia de contaminantes.

El área de Beatriz Oelckers llevaba la relación técnica con los clientes. Su rol era revisar en los contratos de suministros los parámetros de calidad que pedían los clientes y hacerles un *challenge*, negociar sus expectativas y plazos. Por ejemplo, el silicio, que es un parámetro que se ha vuelto importante en el último tiempo porque las baterías del futuro pronto tendrán silicio en el ánodo. Y si hay impurezas de silicio en el cátodo, se producen problemas en el transporte de energía. Controlar los niveles de silicio es difícil, porque es uno de los elementos más abundantes en la tierra, está en el aire y en el polvo. Pero sí se puede planificar con los clientes una reducción gradual y acorde a las capacidades de las plantas.

La información recolectada por esta inteligencia de negocios de SQM permitió generar una agenda específica para definir el conjunto de atributos que debían tener el carbonato y el hidróxido de litio en los próximos años para posicionar los productos de la empresa en esos mercados.

La negociación de calidades es tanto con los clientes como con la Planta de Químicos de litio El Carmen, porque todo pedido de un esfuerzo adicional al área productiva la estresa, ya que tiene muchos parámetros que controlar y que se miden de manera independientes entre sí. Solo un ejemplo: la especificación del carbonato de litio grado batería 9.000 de octubre de 2021 tenía 21 parámetros que controlar, incluidos cloruro, sulfato, sodio, potasio, calcio, magnesio, silicio, boro, hierro, níquel y cobre, entre otros.

Todo se trata de ser muy flexibles para adaptarse a los requerimientos cambiantes y de negociar con el cliente en base a conocimientos técnicos las distintas características del producto, con el fin de que ambas partes queden satisfechas.

El tortuoso proceso de calificación

La calificación de un producto de litio grado batería es un proceso muy exigente porque en las especificaciones de calidad se juega la seguridad y rendimiento de los autos eléctricos. Cada cliente tiene sus propios requerimientos dependiendo de la formulación de su material de cátodo. No hay una receta establecida que funcione para todos los clientes, porque los autos eléctricos y las baterías tienen distintas características y rangos. Hay autos más económicos que duran 60 kilómetros con una carga y hay otros que tienen 500 kilómetros de autonomía. Y el litio que se usa para cada uno es distinto. Los mismos clientes no saben bien lo que van a requerir a futuro porque es un negocio de constante prueba y error. Necesitan probar el producto y medir el desempeño en una batería real. El producto tiene que pasar por un proceso de calificación cuya duración depende de la situación de mercado y país. En Japón una calificación puede tomar hasta dos años y medio.

En 2019 el área de calidad estructuró su proceso de calificación en etapas mediante un diagrama de flujo. La primera fase comienza con el primer contacto con un cliente potencial. Luego viene una revisión documental en que se decide la calidad del producto, el envasado y especificaciones técnicas. Después de eso el cliente recibe diez muestras de

entre 100 y 200 gramos para hacer evaluaciones químicas y físicas a nivel de laboratorio. Si el producto pasa esa evaluación, se envía una muestra mediana de diez kilos para hacer una prueba de cátodos pequeña a nivel piloto. Después se envía un contenedor con una muestra grande, de 10 a 20 toneladas, para hacer una prueba de proceso a escala real (tanto los pasos a seguir como el tamaño y cantidad de muestras requeridas puede variar considerablemente de cliente en cliente).

En cada una de esas etapas el cliente va pidiendo ajustes. Después de todas esas interacciones se puede llegar exitosamente a una calificación de producto aprobada o puede ocurrir que plantee exigencias de calidad que no son factibles de cumplir y no se concrete la venta.

En esta frenética carrera por reducir las impurezas, algunas restricciones de calidad no alcanzan a ser detectadas por los equipos de medición de SQM. En esos casos es necesario desarrollar con el cliente los métodos de análisis. Para esa tarea se creó el laboratorio de desarrollos analíticos en la oficina de SQM en Antofagasta, que trabaja en interacción directa con los clientes.

La tendencia que el área de *product management* y calidad de SQM observa es que, a 2025, el parámetro de partículas magnéticas va a estar en 50 ppb y en los años siguientes bajará a 30 o 25 ppb. Mientras más poderosas se vuelven las baterías, más sensibles son a la presencia de contaminantes.



Este laboratorio trabaja en dos etapas. La primera es investigar y diseñar codo a codo con el cliente el método de medición químico o físico y los equipos que se van a usar. Una vez que el método está aprobado por ambas partes, viene la ejecución. Ese procedimiento nuevo se les enseña a los laboratoristas de la planta de El Carmen, quienes después ejecutan y empiezan a medir con ese método.

Negociar con toda la cadena

Desde que SQM empezó a producir litio para baterías, el cliente directo ha sido el rubro de los fabricantes de cátodos, porque producen el material para las celdas que componen una batería de auto eléctrico. Pero con el boom de la electromovilidad, SQM comenzó a relacionarse con toda la cadena: los fabricantes de cátodos, los productores de baterías y los automotrices.

Un auto eléctrico no tiene un motor con muchas partes y componentes, como los autos de combustión interna. La batería es lo más importante y aunque el litio representa entre el 1% y el 3% de la batería, es el componente esencial para acumular energía y se necesitan 40 kilos de LCE para una batería promedio, si bien la cantidad de litio utilizado depende de la tecnología, capacidad y cantidad de baterías a utilizar en el modelo. La industria de automóviles y de baterías se volvió dependiente de la disponibilidad de litio, cobalto y níquel, que son las materias primas críticas que se usan en los cátodos. Como el mercado de electromovilidad crece tan rápido, entre un 20 y 25% anual, le preocupa la escasez de litio y de otros insumos que ahora están en altísima demanda y que necesita desesperadamente para sus planes de desarrollo. Por eso empezó a intervenir la cadena hacia atrás, a tratar de desarrollar sus propias baterías, sus propios materiales de celdas y de cátodos, como hace Tesla. O, tal como hacen marcas de autos como Mercedes Benz, BMW y fabricantes de baterías como LG, está administrando la cadena de suministros y saliendo a hacer acuerdos de compra de litio directamente con los proveedores. La industria se está consolidando y la cadena de suministros se volvió caótica.

El litio de SQM está integrado de punta a punta, desde el recurso natural extraído del Salar de Atacama hasta el producto químico final: un carbonato e hidróxido de litio grado batería de altísima calidad y pureza de un 99,5%. Esa integración de bajo costo, sustentable y con innovación interna, posiciona a SQM como líder pionero de la industria mundial del litio.

Para SQM este nuevo escenario ha sido un desafío comercial porque significa hacer negocios con compañías que tienen mentalidades distintas y poderes de mercado muy diferentes. Sentarse a negociar con gigantes como Tesla o LG no es lo mismo que negociar con un pequeño productor de cátodos, que pertenece a un rubro muy atomizado y competitivo, con muchas empresas que obtienen poco margen. Cuando una automotora grande compra litio, de alguna manera fija el costo de producción y su margen al proveedor de cátodos y también fija el margen del productor de baterías.

Para el equipo comercial fue un cambio radical, porque estaba acostumbrado a negociar con otro tipo de clientes y se ha visto obligado a ser estratégico. Antes, SQM hacía contratos que duraban un año y se revisaba el precio cada trimestre. Hoy el hambre de litio es tal que los productores grandes de automóviles y de baterías buscan contratos a diez años o mínimo a cinco. Están tomando decisiones de miles de millones de dólares y necesitan el litio para asegurar sus planes comerciales.

Si un contrato que duraba un año tenía ocho páginas, un contrato que dura diez puede tener tantas páginas como una novela, porque hay que dejar todo por escrito ¿Qué pasa si hay un terremoto y se rompe la planta? ¿O si al cuarto año el cliente dice que necesita un producto distinto? ¿Con cuánta anticipación se avisa? ¿Cómo ponerse de acuerdo con el precio en los próximos diez años? Son contratos complejos, que han llevado al área comercial a pensar distintas fórmulas y justificaciones de precios.

La otra complicación al firmar este tipo de contrato es que el productor de baterías o de autos compra el producto, pero no es el usuario directo, sigue siendo el fabricante de cátodos. Se produce un matrimonio de a tres lleno de tensiones. SQM negocia, por ejemplo, con Tesla, pero después el fabricante de cátodos llama a Tesla y le dice “fantástica tu negociación en términos de precios y cantidades, pero yo necesito otra calidad, porque la especificación de sodio no me sirve. El cátodo no va a funcionar”. Si Tesla vuelve a SQM y le pide un producto más exigente, los comerciales le van a responder “si tengo que agregar otro proceso productivo para refinar el producto, te voy a subir el precio”. Y así, la negociación se va enmarañando.

Todo esto ha creado la disyuntiva de definir qué porcentaje del negocio futuro del litio se quiere asegurar con contratos de largo plazo y cuánto se quiere mantener variable, con negociaciones anuales. Y cuánto de ese largo plazo se quiere destinar a la industria de cátodos, cuánto a los fabricantes de baterías y cuánto a las marcas automotrices.

Uno de los secretos de por qué a SQM le ha ido bien con el litio es que se ha mantenido diversificado, no ha puesto todos los huevos en una sola canasta. Si un productor grande pide 100.000 toneladas de litio, en SQM le ofrecen 20.000. La regla es no abandonar a ninguno de sus clientes y mantener una oferta equilibrada. Además, la empresa ha tratado de no dejar de lado el mercado industrial y seguir suministrando a los rubros de cerámica, vidrios y otros usos industriales, que pagan igual que el rubro de las baterías.

Las condiciones del mercado también influyen en esas decisiones, porque a mediados de 2020, cuando el precio del litio se hundió estrepitosamente, SQM no tenía ningún poder de negociación. Un año y medio después faltaba litio en el mercado y los precios estaban por las nubes.

Es un mercado que cambia a velocidades estratosféricas. Y que está envuelto en una carrera tecnológica tan competitiva que hasta hace poco se creía que el hidróxido de litio, por su alta densidad de carga, iba a ser la tecnología dominante para las baterías. De hecho, en el nuevo contrato con Corfo firmado en 2018, el hidróxido de litio tiene *royalties* más altos porque se pronosticaba que iba a ser el producto del futuro. Sin embargo, las baterías que se producen a partir de hidróxido de litio son más inestables que las menos sofisticadas que se producen a partir de carbonato.

A esto se sumó un desarrollo técnico muy rápido liderado por los productores chinos, que llevó las baterías en base a carbonato de litio a niveles muy superiores. Por privilegiar la seguridad de los automóviles, ese es el producto que mejor se vende en 2022. Pero es difícil decir qué es lo que va a pasar en el futuro. Es muy posible que los problemas actuales que tienen las baterías con hidróxido se corrijan y la tendencia se revierta en algún momento.

El futuro es eléctrico

El mercado de la electromovilidad crece a una velocidad que supera las expectativas hasta de los mismos especialistas de inteligencia de negocios de SQM. En 2021 las ventas de autos eléctricos cerraron en 6.700.000 unidades en el mundo. Considerando que se venden alrededor de 85 millones de automóviles livianos, es un porcentaje que se acerca rápidamente al 10% de todo el parque automotriz. Los analistas más optimistas auguran que la penetración de los autos eléctricos con baterías de ion litio va a ser muy rápida, en una década o menos. Suelen comparar este fenómeno con el de una famosa fotografía que muestra la Quinta Avenida de Nueva York en 1900 repleta de carrozas tiradas a caballo versus la misma esquina trece años después, con la calle llena de autos. Cuando hay saltos tecnológicos así de exitosos, la masificación es muy rápida, tal como ocurrió con los *smartphones* cuando salieron al mercado en 2007.

Pronósticos más conservadores dicen que los autos eléctricos van a tomar más tiempo, porque hay ciertas restricciones que superar. De partida, la autonomía todavía no ha alcanzado los niveles que permitan andar más de 600 o 700 kilómetros. Si bien ya hay algunos modelos que lo logran, el promedio de autonomía de los modelos más baratos se mantiene en torno a los 300 o 400 kilómetros. La segunda restricción es la disponibilidad de estaciones de carga o electrolinerías y la velocidad de carga, que suele tardar más de media hora. Finalmente, la razón más importante para que la demanda no sea explosiva es el costo. Actualmente comprar una marca tradicional en su versión eléctrica cuesta aproximadamente un 30% más que el modelo a bencina.

Ya sea lenta o más rápida, la transición tecnológica hacia los autos eléctricos es un hecho y varios países le han puesto fecha en sus legislaciones para cumplir la meta de descarbonizar el planeta. Francia prohibirá la venta de vehículos de combustión en 2035, Alemania en 2030, Holanda en 2030 y en China, la marca BYD, el mayor fabricante de vehículos eléctricos de ese país y el segundo en el mundo después de Tesla, anunció en abril

de 2022 que dejó de fabricar autos a gasolina para centrarse solo en los eléctricos. El gobierno de Chile también presentó una Estrategia Nacional de Electromovilidad en 2021, cuya meta es prohibir la venta de autos de combustión interna en 2035.

El futuro es eléctrico y la demanda del litio también está creciendo de la mano de la fuerte demanda de vehículos eléctricos en Asia y Europa, especialmente en China. En el primer trimestre de 2022 el litio alcanzó un precio récord de 38.000 dólares por tonelada métrica y SQM alcanzó los volúmenes de venta más altos jamás reportados en un trimestre, 38.100 toneladas de carbonato de litio equivalente. La tasa de crecimiento de la demanda en 2021 fue de un 51%. Con esas tasas de crecimiento, la empresa proyecta que en 2025 la demanda mundial de litio va a llegar a un millón de toneladas de carbonato de litio equivalente y en 2030 llegará a tres millones de toneladas.

En este mercado competitivo y cambiante, Australia es el país que produce mayor cantidad de materia prima gracias a sus abundantes minas de espodumeno. Sin embargo la mayoría de su producción es un concentrado intermedio que tiene solamente un 5,5% de Li_2O y que es comprado y procesado por China en sus plantas para producir carbonato e hidróxido de litio. Por su parte, China es el mayor productor de litio refinado en el mundo y el estándar de calidad de sus plantas es el que marca la pauta en el mercado. Pero China tiene pocas fuentes de litio y compra la mayor parte de su materia prima a otros países, como Australia.

Finalmente, está el caso de Chile y su principal productor, SQM, que cerró 2022 con un 20% de *market share*. A diferencia de sus principales competidores, el litio de SQM tiene la gran ventaja de estar integrado de punta a punta, desde el recurso natural extraído del Salar de Atacama, hasta el producto químico final: un carbonato e hidróxido de litio grado batería de altísima calidad y pureza de un 99,5%. Esa integración, lograda con un proceso de bajo costo, sustentable y marcado por la innovación interna, es lo que distingue a SQM Salar de sus competidores y lo convierte en un líder pionero de la industria mundial del litio.

Gracias a la información recolectada de los clientes y a las investigaciones del área de innovación, SQM hoy cuenta con una cantidad sustancial de inteligencia de negocios para identificar los problemas de los clientes y decidir con tiempo futuras inversiones, calidades y planificar de forma estratégica el aumento de producción.

El mercado de las baterías de litio y sus metales

TAMAÑO DEL MERCADO

DE BATERÍAS DE LITIO

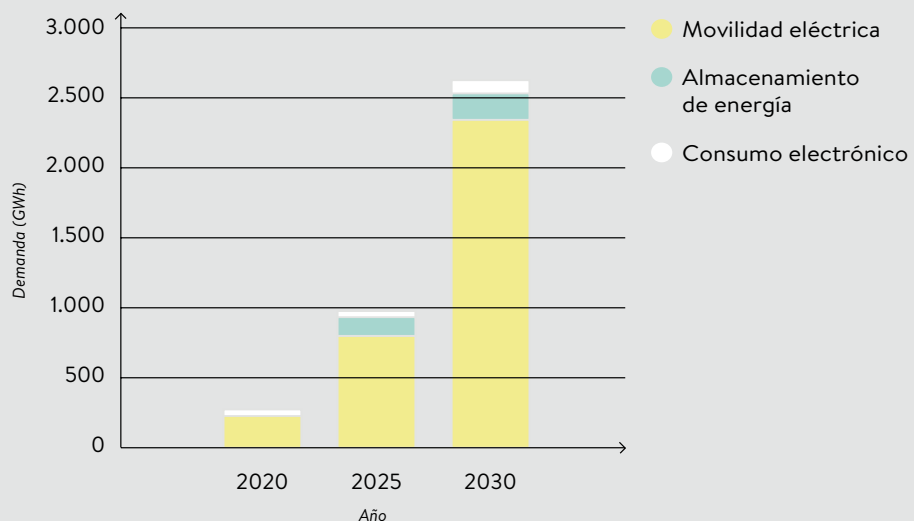
Se espera un crecimiento de un 25% anual hasta 2.600 GWh para el año 2030 en el mercado mundial de las baterías. La concientización en la cultura global respecto a la disminución de CO₂ a la atmósfera mantendrá un impulso en la electrificación de los medios de transporte, junto al despliegue de baterías en las redes eléctricas. En base a esto, se espera que la demanda de movilidad eléctrica tenga un crecimiento masivo de energía de 142 a 2.333 GWh, donde la demanda total del mercado de 2018 a 2030 se atribuye a vehículos eléctricos personales (60%), y el resto a vehículos comerciales. Por otra parte, se espera que el mercado de aparatos electrónicos de consumo se vuelva casi marginal (solo un 3%) en el año 2030.

Mercado de las baterías según su química

De acuerdo a un análisis de mercado realizado por Technavio en 2020, los sistemas de baterías secundarias representan casi tres cuartas partes del mercado mundial de baterías con un 73,8 % mismo, mientras que las baterías primarias representan un 27,2 %. Por otra parte, si se analiza de forma detallada el mercado de las baterías secundarias, las baterías de plomo ácido y baterías de ion litio abarcan un 49,94% y 45,74% de la cuota del mercado. También en el mismo informe se proyecta que para el año

2024 el mayor crecimiento del mercado (81,77 %) de baterías recargables proven- drá de las baterías de ion litio, debido a su creciente demanda a nivel mundial. En un contexto global, el mercado de las baterías está segmentado en baterías industriales, automotrices y de consumo, en donde existe un cambio en el mismo hacia un mayor uso de baterías de ion litio, disminuyendo el consumo de baterías de plomo ácido y otros sistemas de baterías.

Demanda mundial de baterías por aplicación desde 2020 hasta 2030.



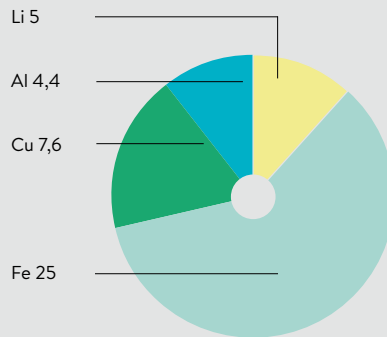
METALES, COMPOSICIÓN GENERAL Y PRECIOS EN LAS BATERÍAS DE LITIO

Las baterías, dependiendo de su tecnología y modelo específico, requieren de diversos metales para su fabricación. Estos metales son obtenidos principalmente por procesos de la metalurgia extractiva en yacimientos terrestres. Por otra parte, las baterías (en especial de pequeños productos electrónicos de consumo) al terminar su ciclo de vida son desechadas o incineradas para obtener componentes metálicos valiosos. Sin embargo, estas prácticas son consideradas no ecológicas y, además, los desechos de baterías contienen una alta cantidad de metales valiosos como litio, níquel, cadmio, cobre y plomo. La recuperación de metales de batería mediante reciclaje es una buena fuente alternativa para la recuperación de metales valiosos y además reducirá las preocupaciones ambientales y de salud humana. Otra fuente alternativa son los depósitos submarinos, los que tienen un alto contenido de metales valiosos necesarios para la fabricación de las baterías, como cobalto, níquel, manganeso y cobre.

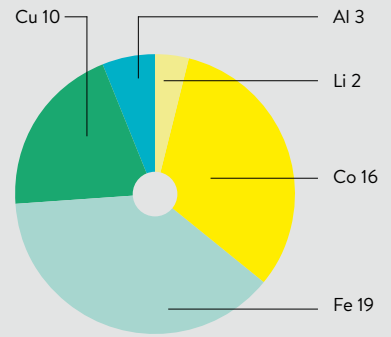
A pesar de las diversas fuentes para la obtención de materiales necesarios para la fabricación de baterías, el mercado presenta un crecimiento muy acelerado, y la necesidad de descarbonizar la industria energética genera en consecuencia una muy alta demanda de metales.

Metales valiosos en baterías de ion litio descargadas (% en peso).

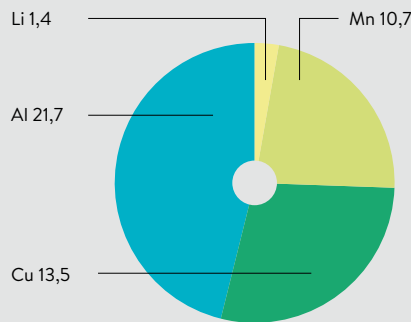
LiFePO₂



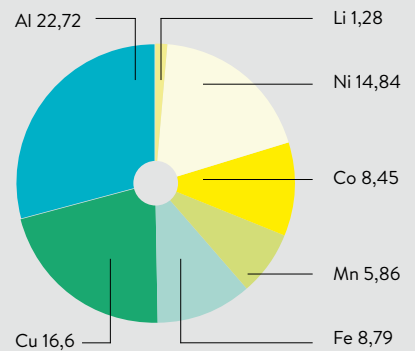
LiCoO₂



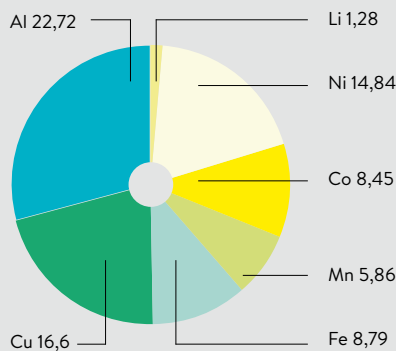
LiMn₂O₄



LiNiCoMnO₂



Baterías gastadas de tipo mixto



Como se puede observar, el litio será el elemento más demandado en el mercado mundial de las baterías, proyectando un crecimiento del 965% en su demanda desde el año 2017 hasta el año 2050. Esto es consistente con el acelerado crecimiento del mercado de baterías de ion litio, la cual se proyecta como la batería predominante en ventas y desarrollo tecnológico.

El cobalto, níquel y litio son los metales de mayor valor. Además, entre estos, el cobalto y litio son considerados como “metales críticos” a nivel mundial por su riesgo de escasez de suministro y su mayor impacto en la economía respecto a la mayoría de otras materias primas.

Debido a esto, la mayoría de los procesos actuales de reciclaje e investigación se centran en la recuperación de estos elementos. El precio del cobalto había caído considerablemente a partir del año 2019, en gran medida porque grandes compañías dejaron de comprar este elemento a la República Democrática del Congo debido a la explotación infantil, con niños entre 3 y 7 años trabajando en las minas del sur del país y a la mala distribución de riquezas en su población. Aunque son el mayor productor del mundo (60%), Congo es uno de los países más empobrecidos. Sin embargo, la necesidad de generar un modelo energético mundial más sustentable, combatir el calenta-

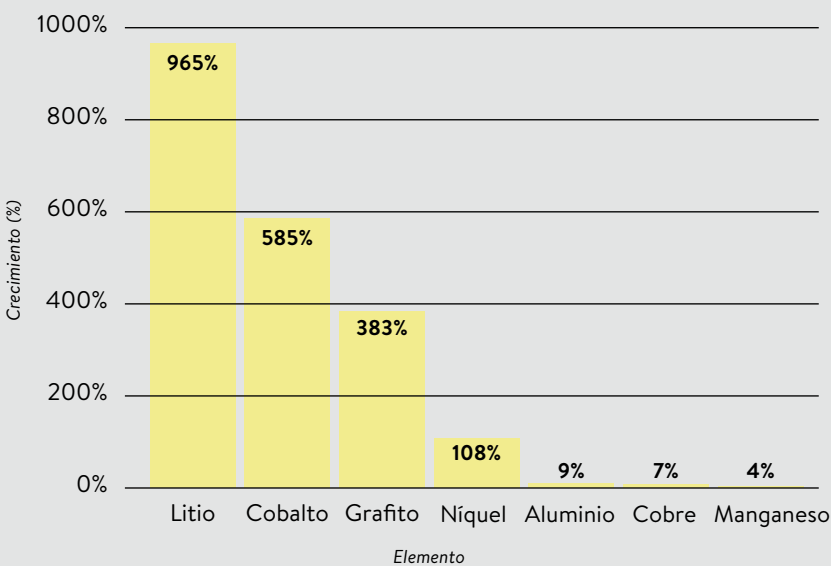
miento global y la escasez de menas de alta ley en grandes cantidades en otros lugares del mundo, ha mantenido una alta demanda por este *commodity* y se mantiene la alta venta por parte de este país, lo que ha impulsado nuevamente un alza en su precio a partir de 2021.

Por otra parte, el níquel ha presentado un precio relativamente estable, entre los 15.000 y 20.000 dólares aproximadamente, mostrando un alza en su precio a partir del año 2022.

Finalmente, el *commodity* que presenta un mayor crecimiento en el tiempo respecto a su precio y una mejor proyección en su demanda es el litio.

El litio tuvo una baja considerable en

Crecimiento en la demanda de elementos desde el año 2017 hasta el 2050.



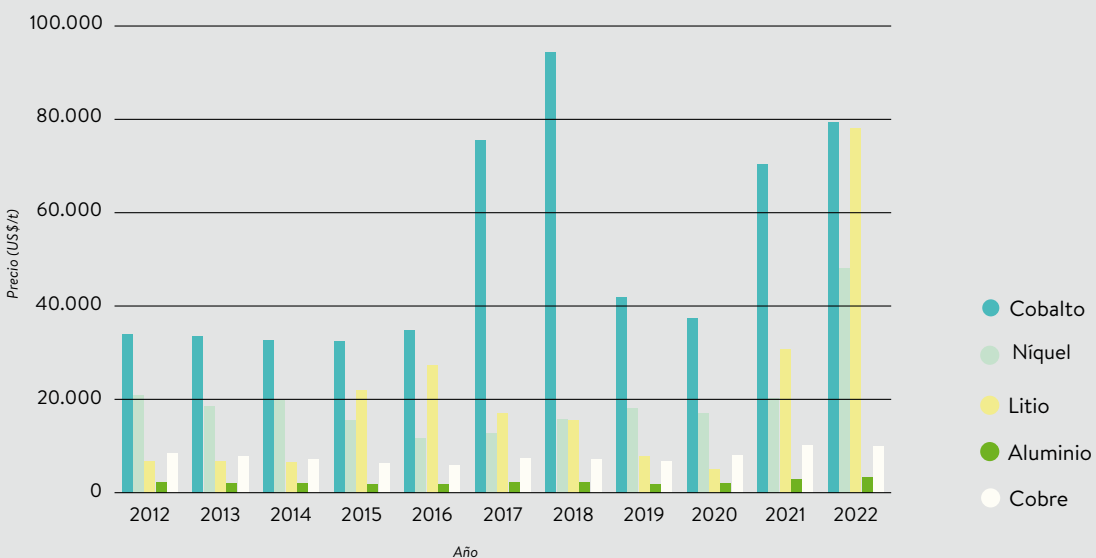
En este gráfico se presenta cómo aumentará la demanda de los diversos metales que se utilizan en la fabricación de baterías en los próximos 30 años.

2019, donde cayó un 51% desde su precio máximo en 2018, y alcanzó su precio mínimo histórico en 2020. Según el gerente de metales y derivados de S&P Global Platts, Marcel Goldenberg, esto ocurrió debido a que la oferta de litio creció mucho más rápido que la demanda de litio y esto se puede decir para todos los materiales críticos de las baterías de ion litio. Además, no era claro un aumento en la tasa de recuperación en la demanda de vehículos eléctricos. Este exceso en la oferta de litio se debió principalmente a la puesta en marcha de operaciones de minerales de litio en Australia que superaron la capacidad de conversión de minerales en China. La

puesta en marcha de cuatro proyectos de mineral de litio en Australia y Brasil, junto con el aumento de la producción en varias operaciones de salmuera y minerales existentes, fue responsable del aumento de la capacidad. Sin embargo, a partir del 8 de diciembre de 2021, el litio comenzó a tener un crecimiento exponencial en su precio. Según datos de fuentes como Trading Economic e Investing, el 8 de diciembre de 2021 el precio de este *commodity* era de 29.490 dólares la tonelada. Posteriormente, el 11 de febrero de 2022, el litio superó los 60.000 dólares la tonelada, y el 8 de marzo de 2022, su precio es cercano a los 80.000 dólares la tonelada. Esto ha

ocurrido como consecuencia de una elevada demanda mundial conforme avanza la producción de baterías para vehículos eléctricos sin que la de litio sea suficiente, motivo por el que este *commodity* es llamado el “petróleo del futuro”.

Comparación en el crecimiento del precio de metales necesarios para una batería de ion litio.



Rango de composición y evolución en el precio de metales necesarios para fabricar una batería de ion litio (actualizado: 08/03/2022).

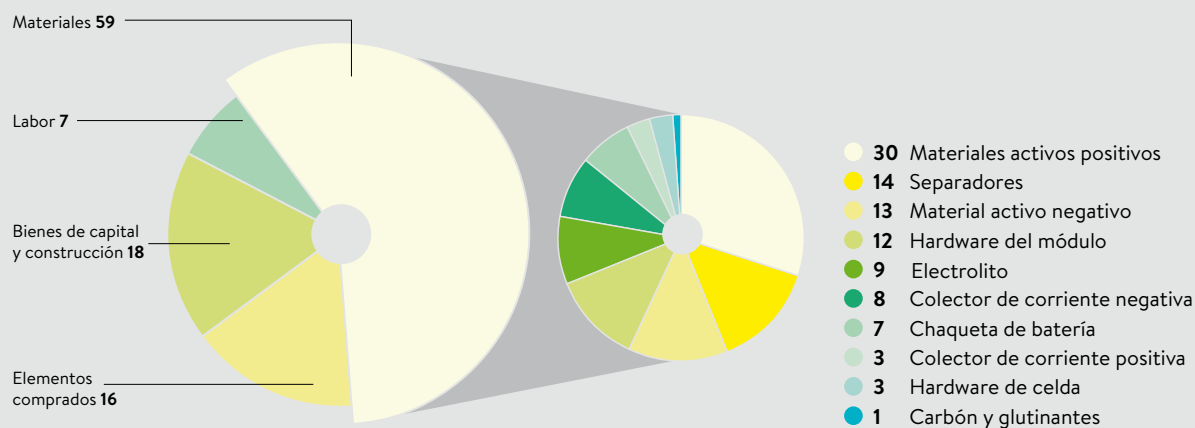
		Valor (US\$/t)					
Componente	Composición (%)	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Cobalto	5-20	33.866	33.628	32.673	32.434	34.821	75.633
Níquel	5-15	20.907	18.587	19.928	15.471	11.712	12.786
Litio*	1-7	6.750	6.840	6.566	21.942	27.300	17.090
Manganeso	10-15	6	6	5	5	5	6
Hierro**	5-25	148	154	123	67	80	88
Aluminio	4-24	2.307	2.050	2.081	1.918	1.824	2.268
Cobre	5-10	8.532	7.738	7.143	6.283	5.975	7.408

		Valor (US\$/t)				
Componente	Composición (%)	2018	2019	2020	2021	2022
Cobalto	5-20	94.487	41.981	37.446	70.382	79.295
Níquel	5-15	15.686	18.210	17.082	20.304	48.201
Litio*	1-7	15.600	7.750	5.100	30.700	78.194
Manganeso	10-15	5	4	5	5	5
Hierro**	5-25	77	122	138	216	149
Aluminio	4-24	2.299	1.902	2.034	2.953	3.298
Cobre	5-10	7.253	6.724	7.937	10.207	9.965

*El precio del litio se refiere al carbonato de litio. / ** El precio del hierro se refiere a mineral de hierro.

Una típica batería de ion litio NMC, tiene como composición aproximada un 7% Co, 7% Li, 4% Ni, 5% Mn, 10% Cu, 15% Al, 16% grafito y 36% de otros materiales, donde el litio se expresa como equivalente de carbonato de litio (1 g Li = 5,17 g LCE).

Desglose de costos para la manufacturación de baterías de litio.



La mayor parte del costo (59%) de una batería es en materiales. Luego, este 59% es segmentado en los diferentes tipos de materiales, en donde un 30% del costo corresponde al cátodo de la batería y es importante destacar que el cobalto representa el 60% del costo del cátodo. Por otra parte, el litio es un elemento indispensable para el funcionamiento de las baterías de ion litio y representa aproximadamente un 7% del costo total de la misma.

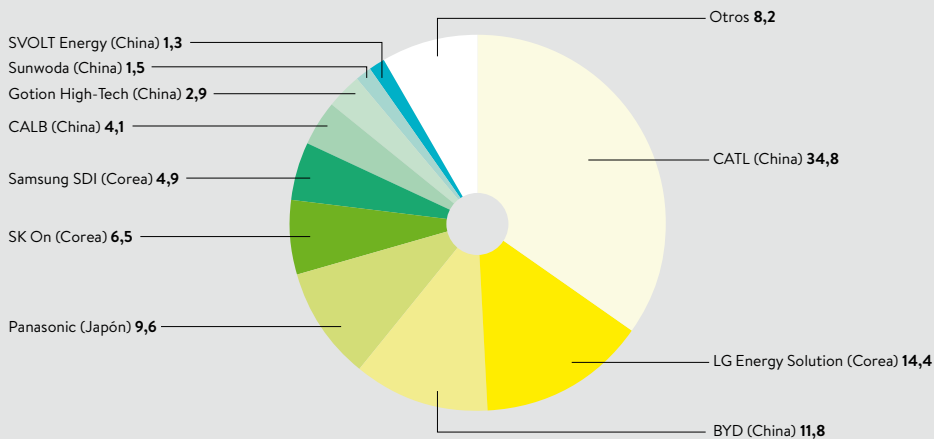
Sin embargo, a pesar de que el litio es un componente estratégico y fundamental para la fabricación de baterías, se debe recordar que además se necesita grafito, manganeso, níquel y cobalto, materiales necesarios en la batería más demandada, la NMC. Materias primas de las cuales Chile no presenta grandes yacimientos ni gran producción. Para contextualizar, la producción de manganeso en Chile ha sido principalmente para uso

en aleaciones de acero, y se mantuvo relativamente estable hasta el año 2009. Después de esta fecha, solo existe una producción menor, ya que las principales empresas productoras de manganeso en el país se encuentran actualmente en proceso de cierre. Según informes internos de entidades gubernamentales de Chile, la producción de manganeso cayó de 62.887 t anuales en 1996 a 5.722 t anuales en 2009. En cuanto al cobalto, la literatura y los registros históricos en Chile indican que la explotación en el país se inició a partir de 1844, teniendo su *peak* de producción durante la Segunda Guerra Mundial (20.000 t/año). Después de la guerra, la demanda de Co disminuyó paulatinamente y, en consecuencia, se cerraron las empresas mineras dedicadas a la explotación y producción de este elemento, situación que continúa hasta hoy. Existe interés por parte de los inversionistas de reactivar la explotación de

cobalto de estas antiguas minas abandonadas. Sin embargo, aunque en esos años Chile operaba con leyes de 7,3%, mejores que el actual 3% del Congo, no se sabe si los yacimientos chilenos constituyen un sector minero viable en las condiciones actuales.

La carencia de otros materiales estratégicos indispensables refuta la idea que se menciona constantemente sobre la "gran ventaja comparativa" que tiene Chile respecto a otros países para la fabricación de baterías de ion litio. Ya que, a pesar de que el país produce carbonato de litio, no se cuenta con otros elementos fundamentales como cobalto, níquel, manganeso, etc. que en su conjunto representan un mayor valor en el costo para elaborar una batería. Sin embargo, esto no es un impedimento para que el país comience a fabricar baterías de litio.

Mercado mundial de fabricantes de baterías eléctricas.



FABRICANTES DE BATERÍAS DE LITIO

A la masiva producción de Tesla Motors y otros fabricantes de autos eléctricos le ha surgido un contratiempo: no existe suficiente oferta de litio en el mercado para sostener las plantas de fabricación de baterías en operación y las que se proyectan para el futuro cercano. En el año 2021, Tesla Motors vendió cerca de 1.000.000 de vehículos eléctricos en el mundo, cifra que consolida a esta compañía como el líder mundial en la fabricación de vehículos eléctricos de alta gama y a su vez como la marca más valiosa en la venta de vehículos no convencionales. En el mundo, las fábricas automotrices presentan problemas de logística y suministro, en especial por la escasez de chips (aunque se espera que esta escasez culmine a comienzos de 2023). Estos se suman al problema ligado a la escasez de litio de las baterías, el cual amenaza con convertirse en el embudo de la industria. China domina el mercado mundial de baterías de vehículos eléctricos y controla la cadena del suministro

mundial de baterías de ion litio, la que obtuvieron tras invertir cerca de 60.000 millones de dólares en la última década. Además, según la revista *Forbes*, China tiene el 8% de las reservas mundiales de litio, el doble que Estados Unidos. China tiene una clara hegemonía con un 56,4% del mercado, seguido de Corea con un 25,8%. Además, en el gráfico de esta página se puede ver el claro dominio en el mercado por parte de la Compañía CATL, quienes ostentan un 34,8% del mercado mundial. Gran parte de su éxito se debe a su amplia cartera de clientes, ya que no solo trabaja en conjunto con fabricantes locales como BAIC, GAC o SAIC, sino también con productores como BMW, Honda, Mercedes Benz, Volkswagen, Toyota, Tesla, Stellantis y Volvo. Además, recientemente firmó un acuerdo con Ford para suministrar las baterías de Mustang Mach-E y F-150 Lightning. A causa de esto, durante el final de la presidencia de Donald Trump los legis-

ladores de Estados Unidos aprobaron la puesta en marcha del proyecto Lithium America, el cual contempla la explotación y excavación de la primera mina de litio a gran escala en el estado de Nevada, con el fin de evitar la dependencia en la importación de mineral y tecnologías litio (en particular con China). Además, a comienzos de 2022 el gobierno de Joe Biden anunció que la Ley de infraestructura bipartidista destinará más de siete mil millones de dólares para fortalecer la cadena de suministro de baterías de Estados Unidos, lo que ayudará a evitar interrupciones, reducir costos y acelerar la producción de baterías en dicho país para satisfacer esta demanda. Asimismo, el Departamento de Energía anunció que destinará más de tres mil millones de dólares para apoyar la fabricación, el procesamiento y el reciclaje de baterías financiado por esta ley. Por lo cual, se espera que la brecha de desventaja de Estados Unidos con China disminuya.

LAS PROYECCIONES DE SQM

Las proyecciones de SQM indican que la demanda al 2025 podría estar entre 800.000 y un millón de toneladas de LCE (carbonato de litio equivalente). Para 2030, existen escenarios que indican que la demanda podría superar los dos millones de toneladas. Esto indica un crecimiento anual promedio cercano a 20%, cifra que es muy importante y que cuesta ver en otros minerales. El gran *driver* de crecimiento es la penetración de autos eléctricos. En 2020, el número de autos eléctricos vendidos a nivel mundial fue de un poco más de tres millones de unidades. En 2025, se espera más de 13 millones. Para 2030, unos 30 millones, lo que significa un crecimiento de diez veces en diez años.

¿Por qué es tan importante la explotación de litio?

Porque desarrollar una mina de litio puede llevar entre seis y siete años previa adjudicación de los permisos de explotación gubernamentales, tanto por sus necesidades de capitalización, su complejidad técnica, estudios de impacto ambiental y las demoras que estas discusiones suelen ocasionar (por ejemplo, negociaciones con las comunidades aledañas). En cambio, la construcción de una fábrica de baterías de litio solo toma dos años. Esta desincronización en los tiempos ha causado que muchos fabricantes anuncien planes para la apertura de plantas de vehículos

eléctricos y fábricas de baterías, asumiendo que habrá litio suficiente para abastecerla, lo cual ahora claramente no es así. En consecuencia, cualquier objetivo respecto a fabricación de vehículos eléctricos o baterías a partir de 2025 tiene encendida una luz roja debido a la escasez de litio.

Esto demuestra la importancia estratégica en la venta de carbonato e hidróxido de litio en el mercado mundial, y por qué Chile debería expandir y aumentar su producción, con el fin de reafirmar su posición como el segundo mayor exportador de litio en el mundo.

The background is a solid yellow color. Overlaid on this are several white, thin, irregular lines that form abstract, angular shapes. These lines are scattered across the page, with some forming larger, more complex shapes and others being shorter, simpler segments. The overall effect is a minimalist, modern graphic design.

Referencias bibliográficas



1. Abdullah AlShemmary, E. N., Kadhom, L. M., & Al-Fahham, W. J. (2013). Information technology and stand-alone solar systems in tertiary institutions. *Energy Procedia*, 36, 369–379. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.042>
2. Abe, R. (2019). Introducing autonomous buses and taxis: Quantifying the potential benefits in Japanese transportation systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 126, 94–113. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.06.003>
3. Adhvaryu, A., Sungb, C., & Erhan, S. Z. (2005). Fatty acids and antioxidant effects on grease microstructures. *Industrial Crops and Products*, 21(3), 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.03.003>
4. Aguirre, P., Sánchez-Rodríguez, A., Gentina, J., & Schippers, A. (2017). Effect of Galactose on EPS Production and Attachment of *Acidithiobacillus thiooxidans* to Mineral Surfaces. *Solid State Phenomena*, 262, 476–481. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.262.476>
5. Alamy. (2020). *Electricidad y aplicaciones de laboratorio*. <https://www.alamy.es/electricidad-y-aplicaciones-de-laboratorio-primero-las-baterias-de-plomo-acido-inventada-por-gaston-plant-e-1859-el-electrodo-negativo-es-de-plomo-mientras-que-el-electrodo-positivo-es-de-oxido-de-plomo-image227675380.html>
6. Alonso, H., Risacher, F., & Salazar, C. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones - Chile*. https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/6649/UCN-HUM0001_v1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
7. Amado, F. A., Rosales, M., Cofré, E., & Godfrey, L. (2019). Sources of lithium in brine deposits of the Atacama Desert, northern Chile. *Goldschmidt Conference At: Barcelona, Spain*.
8. An, J. W., Kang, D. J., Tran, K. T., Kim, M. J., Lim, T., & Tran, T. (2012). Recovery of lithium from Uyuni salar brine. *Hydrometallurgy*, 117–118, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.02.008>
9. Apple. (2020). *Determinar el número de ciclos de la batería para computadoras portátiles Mac*. <https://www.apple.com/la/>
10. AsianMetal. (2022). Lithium Price. <http://www.asianmetal.com/LithiumPrice/Lithium.html>
11. AT Mineral Processing. (2018). *Metal ore mining in Europe*. https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_Metal_ore_mining_in_Europe_3257608.html
12. Ausenco. (2018). *TECHNICAL REPORT ON THE FEASIBILITY STUDY FOR THE SONORA LITHIUM PROJECT, MEXICO*. <https://www.bacanoralithium.com/pdfs/Bacanora-FS-Technical-Report-25-01-2018.pdf>
13. Ayodele, B. V., & Mustapa, S. I. (2020). Life Cycle Cost Assessment of Electric Vehicles: A Review and Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 12(6), 2387. <https://doi.org/10.3390/su12062387>
14. Ayuso, P., Beltran, H., Segarra-Tamarit, J., & Pérez, E. (2020). Optimized profitability of LFP and NMC Li-ion batteries in residential PV applications. *Mathematics and Computers in Simulation*. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.02.011>
15. BACANORA lithium. (2021). *SONORA LITHIUM*. <https://www.bacanoralithium.com/projects/sonora-lithium/>
16. Banza Lubaba Nkulu, C., Casas, L., Haufroid, V., De Putter, T., Saenen, N. D., Kayembe-Kitenge, T., Musa Obadia, P., Kyanika Wa Mukoma, D., Lunda Ilunga, J. M., Nawrot, T. S., Luboya Numbi, O., Smolders, E., & Nemery, B. (2018). Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. *Nature Sustainability*, 1(9), 495–504. <https://www.nature.com/articles/s41893-018-0139-4>
17. Baran, E. J. (2017a). LITIO EN GRASAS LUBRICANTES. In *LITIO Un Recurso Natural Estratégico* (pp. 168–174).
18. Baran, E. J. (2017b). OTRAS APLICACIONES DEL LITIO. In *LITIO Un Recurso Natural Estratégico* (pp. 223–230).
19. Bard, A. J. (2012). *Electrochemical Dictionary*. Springer. pp. 523–524.
20. Barghamadi, M., Musameh, M., Rüther, T., Bhatt, A. I., Hollenkamp, A. F., & Best, A. S. (2019). Electrolyte for Lithium-Sulfur Batteries. In *Lithium-Sulfur Batteries* (pp. 71–119). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119297895.ch3>
21. Barker, J. M., Kogel, J. E., Krukowsk, S. T., & Trivedi, N. C. (2006). *Industrial Minerals & Rocks*.
22. Barufaldi, M., Pinna, E., Drailin, D., Suárez, D., & Rodríguez, M. (2018). Metodología de Superficie de Respuesta Aplicada al Proceso Hidrometalúrgico de Extracción de Li y Co desde LiBs Usando Ácido Tartárico y Glucosa. In *XIV Jornadas Argentinas de Tratamientos de Minerales*.
23. Battery University Group. (2020a). *BU-205: Types of Lithium-ion*. https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
24. Battery University Group. (2020b). *BU-212: Future Batteries*. https://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries
25. Battery University Group. (2020c). *BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries*. https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries
26. Battery University Group. (2020d). *BU-218: Summary Table of Future Batteries*. https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_218_summary_table_of_future_batteries
27. Battery University Group. (2020e). *BU-402: What Is C-rate?* https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/what_is_the_c_rate
28. BBC. (2017). *El enigma sin resolver de las "pilas de Bagdad"*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-39558387>
29. BBC. (2019a). *La innovadora (¿y arriesgada?) apuesta de Tesla de vender autos solo por internet*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47414841>
30. BBC. (2019b). *Tesla Cybertruck: Elon Musk's space car launch*. <https://www.bbc.co.uk/newsround/50518418>
31. Betz, G. C. (1938). Lithium Minerals and Compounds in Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 21, 189–191. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1938.tb15763.x>
32. Bevilaqua, D., Suegama, P., Garcia, J., & Benedetti, A. (2010). Electrochemical Studies of Sulphide Minerals in the Presence and Absencen of A. ferroxidans. In *Biohydrometallurgical Processes: a practical approach*.
33. Bill, R. (2019). <https://www.forbes.com/sites/billroberson/2019/07/19/chewie-punch-it-if-the-new-tesla-roadster-gets-a-thruster-system-how-might-it-work/#6177869d6ae1>
34. Biography.com Editors. (2020a). *Benjamin Franklin Biography*. <https://www.biography.com/scholar/benjamin-franklin>
35. Biography.com Editors. (2020b). *Elon Musk Biography*. <https://www.biography.com/business-figure/elon-musk>

36. Bnamericas. (2020). *Firma chilena SQM suministrará litio a LG Energy Solution*. <https://www.bnamericas.com/es/noticias/firma-chilena-sqm-firma-contrato-para-suministrar-litio-a-lg-energy-solution>
37. Boryta, D. A., Kullberg, T. F. & Thurston, A. M. (2001). *Recovery of lithium compounds from brines* (Patent No. US 6,207,126 B1).
38. Britannica. (2020a). *Alessandro Volta*. <https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>
39. Britannica. (2020b). *Gaston Planté*. <https://www.britannica.com/biography/Gaston-Plante>
40. Britannica. (2020c). *Georges Leclanché*. <https://www.britannica.com/biography/Georges-Leclanche>
41. Britannica. (2020). *John Frederic Daniell*. <https://www.britannica.com/biography/John-Frederic-Daniell>
42. Britannica. (2020d). *Sodium*. <https://www.britannica.com/science/sodium>
43. British Geological Survey. (2016). *Lithium*.
44. Buongiorno, J., Carmichael, B., Dunkin, B., Parsons, J., & Smit, D. (2021). Can Nuclear Batteries Be Economically Competitive in Large Markets? *Energies*, 14(14), 4385. <https://doi.org/10.3390/en14144385>
45. Burga, D., Burga, E., Genck, W., & Weber, D. (2019). *NI 43 - 101 TECHNICAL REPORT Updated Mineral Resource Estimate for the Cauchari-Olaroz Project, Jujuy Province, Argentina*.
46. Cabrera, V., & Velásquez, C. (2019). Factibilidad Técnico económica de la producción de hidróxido de litio a pequeña escala a partir de salmueras. *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities"*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.12>
47. Carretero, E., Sobral, L., de Oliveira, D., & de Souza, C. (2010). Bioleaching of Metal Sulphides Ores and Concentrates. In *Biohydrometallurgical Processes: a practical approach*.
48. Carty, W. M., & Senapati, U. (1997). Porcelain-Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81, 3–20.
49. Castillo, S., Ansart, F., Laberty-Robert, C., & Portal, J. (2002). Advances in the recovering of spent lithium battery compounds. *Journal of Power Sources*, 112(1), 247–254. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00361-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00361-0)
50. Castromil, J. (2009). *La Pila de Bagdad*.
51. CATL. (2021). *CATL and Ford announce Global Strategic Cooperation to promote EVs worldwide*. <https://www.catl.com/en/news/968.html>
52. ChemSystems. (2013). *Styrene Butadiene Rubber(SBR)*.
53. Chen, L., Tang, X., Zhang, Y., Li, L., Zeng, Z., & Zhang, Y. (2011). Process for the recovery of cobalt oxalate from spent lithium-ion batteries. *Hydrometallurgy*, 108(1), 80–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.010>
54. Chen, W.-S., & Ho, H.-J. (2018). Recovery of Valuable Metals from Lithium-Ion Batteries NMC Cathode Waste Materials by Hydrometallurgical Methods. *Metals*, 8(5), 321. <https://doi.org/10.3390/met8050321>
55. Chen, X., Bai, Y., Zhao, C., Shen, X., & Zhang, Q. (2020). Lithium Bonds in Lithium Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, anie.201915623. <https://doi.org/10.1002/anie.201915623>
56. Chen, Y., Chowdhury, S. D., & Donada, C. (2019). Mirroring hypothesis and integrality : Evidence from Tesla Motors*. *Journal of Engineering and Technology Management*, 54(August), 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2019.09.001>
57. Chen, Y., & Pérez, Y. (2018). Business Model Design: Lessons Learned from Tesla Motors. In *Towards a Sustainable Economy: Paradoxes and Trends in Energy and Transportation* (pp. 53–69). https://doi.org/10.1007/978-3-319-79060-2_4
58. Chen, J. (2022). Research on the valuation of Tesla stock. *BCP Business & Management*, 19, 308–315. <https://doi.org/10.54691/bcpbm.v19i.819>
59. Cifuentes, C. (2019). *Chile, minería más allá del cobre*. https://www.cochilco.cl/Presentaciones/2019_08_22_Chile_-_minería_más_allá_del_cobre_CCG.pdf
60. Claessens, M. (2020). What Is Nuclear Fusion? In *ITER: The Giant Fusion Reactor* (pp. 11–18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27581-5_2
61. COCHILCO. (2018). *MERCADO INTERNACIONAL DEL LITIO Y SU POTENCIAL EN CHILE*. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20Litio%209%2001%202019.pdf>
62. COCHILCO. (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030*.
63. CODELCO. (2012). *Memoria Anual 2012*. <https://www.codelco.com/recursos-y-reservas-mineras/memoria2012/2013-04-16/103545.html>
64. Cohen, A. (2020). *Tesla's New Lithium-Ion Patent Brings Company Closer to Promised 1 Million-Mile Battery*. <https://www.forbes.com/sites/arielcohen/2020/12/30/teslas-new-lithium-ion-patent-brings-company-closer-to-promised-1-million-mile-battery/?sh=25979c8833e3>
65. Collazo, S. (2017). *EVAPORACIÓN MECÁNICA DE SALMUERAS DE LITIO*. Universidad Andrés Bello.
66. Concheso, A. (2006). *NUEVOS ÁNODOS DE CARBONO PARA BATERÍAS DE ION-LITIO A PARTIR DE DERIVADOS DEL CARBÓN Y DEL PETRÓLEO*. Universidad de Oviedo.
67. Contestabile, M., Panero, S., & Scrosati, B. (2001). A laboratory-scale lithium-ion battery recycling process. *Journal of Power Sources*, 92(1), 65–69. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00523-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00523-1)
68. Cooke, P. (2020). Silicon Valley Imperialists Create New Model Villages as Smart Cities in Their Own Image. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(2), 24. <https://doi.org/10.3390/joitmc6020024>
69. Cummings, A. M. (1970). Lithium. In 1970 U.S. Government Printing Office (Ed.), *Mineral Facts and Problems* (pp. 1073–1081).
70. Dai, K., Xie, Y.-T., Wang, Y.-J., Song, Z.-S., & Qilu. (2008). Effect of fluorine in the preparation of Li(Ni 1/3Co 1/3Mn 1/3)O 2 via hydroxide co-precipitation. *Electrochimica Acta - ELECTROCHIM ACTA*, 53, 3257–3261. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.10.017>
71. Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook*.
72. De la Fuente, A. (2009). *Jobs, Sony, Honda y Ponce*. <https://www.latercera.com/revista-que-pasa/16-586-9-jobs-sony-honda-y-ponce/>
73. Deberitz, J., & Boche, G. (2003). Lithium und seine Verbindungen - Industrielle, medizinische und wissenschaftliche Bedeutung. *Chemie in Unserer Zeit*, 37(4), 258–266. <https://doi.org/10.1002/ciuz.200300264>

74. Delgado, M. A., Franco, J. M., Valencia, C., Moreno, G., & Gallegos, C. (2006). *Processing and Formulation of Lithium Lubricating Greases*. *AIP Conference Proceedings* 832, 257. <https://doi.org/10.1063/1.2204502>
75. Delgado, M. A., Valencia, C., Sánchez, M. C., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2006). Thermorheological behaviour of a lithium lubricating grease. *Tribology Letters*, 23, 47–54. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9109-5>
76. Deutsche Lithium GmbH. (2019). *Zinnwald Lithium Project*.
77. Diaz, J. A., Serrano, J., & Leiva, E. (2018). Bioleaching of Arsenic-Bearing Copper Ores. *Minerals*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/min8050215>
78. DiClerico, D. (2016). *Here's How Much Tesla's New Solar Roof Could Cost*. <https://www.consumerreports.org/roofing/heres-how-much-teslas-new-solar-roof-shingles-could-cost/>
79. Donati, E. (2003). Biominería: una tecnología alternativa. *CINDEFI (UNLP-CONICET)*.
80. Dorella, G., & Mansur, M. B. (2007). A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. *Journal of Power Sources*, 170(1), 210–215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.04.025>
81. Dorin, T., Vahid, A., & Lamb, J. (2018). Aluminium Lithium Alloys. In *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00011-4>
82. Drailin, D., Suárez, D., Barufaldi, M., Pinna, E., & Rodríguez, M. (2018). Estudio Comparativo de la Lixiviación de LiCoO₂ Usando HCl con y sin Agente Reductor. In *XIV Jornadas Argentinas de Tratamientos de Minerales* (pp. 602–611).
83. Duan, X., Zhu, W., Ruan, Z., Xie, M., Chen, J., & Ren, X. (2022). Recycling of Lithium Batteries—A Review. *Energies*, 15(5), 1611. <https://doi.org/10.3390/en15051611>
84. Durante, N. (2021). <https://www.df.cl/empresas/energia/sqm-hay-un-potencial-tremendo-en-la-industria-del-litio-hemos>
85. Dye, J. L. (2020). *Lithium*. <https://www.britannica.com/science/lithium-chemical-element>
86. Eggert, G. (1995). On the origin of a gilding method of the Baghdad silversmiths. *Gold Bulletin*, 28(1), 12–16. <https://doi.org/10.1007/BF03214732>
87. Ehren, P. (2014). *Process for producing lithium carbonate from concentrated lithium brine* (Patent No. US 2014/0334997 A1).
88. Ehsani, R., Fourie, L., Hutson, A., Peldiak, D., Spiering, R., Young, J., & Armstrong, K. (2018). *Technical Report on the PreFeasibility Study for the Thacker Pass Project, Humboldt County, Nevada, USA*.
89. Ellis, T., & Mirza, A. (2016). *Battery recycling: Defining the market and identifying the technology required to keep high value materials in the economy and out of the waste dump*.
90. Els, F. (2019). *Lithium price: Worst may be over for Australian producers*. <https://www.mining.com/lithium-price-worst-not-over-for-australian-producers/>
91. Els, F. (2020). *Lithium price: 50% of hard-rock miners are losing money*. <https://www.mining.com/lithium-price-50-of-hard-rock-miners-are-losing-money/>
92. Elschenbroich, C. (2006). *Organometallics, 3rd, Completely Revised and Extended Edition*.
93. Epiroc. (2021). *Boomer 282*. <https://www.epiroc.com/es-cl/products/drill-rigs/face-drill-rigs/boomer-282>
94. Eric S. Hintz. (2008). Portable Power: Inventor Samuel Ruben and the Birth of Duracell. *Technology and Culture*, 50(1), 24–57. <https://doi.org/10.1353/tech.0.0203>
95. Escuelapedia. (2020). *Pila de Alessandro Volta*. <http://www.escuelapedia.com/pila-de-alessandro-volta/>
96. Eswara, N., Gokhale, A., & Wnahill, R. (2014). Aerospace Applications of Aluminum–Lithium Alloys. In *Aluminum-lithium Alloys*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401698-9.00015-X>
97. *European Li-ion Battery Advanced Manufacturing for Electric Vehicles*. (2014).
98. European Metals. (2021). *Cinovec Lithium / Tin Project*.
99. Fan, X., Yu, X., Guo, Y., & Deng, T. (2018). Recovery of Boron from Underground Brine by Continuous Centrifugal Extraction with 2-Ethyl-1,3-hexanediol (EHD) and Its Mechanism. *Journal of Chemistry*, 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/7530837>
100. Ferreira, D. A., Prados, L. M. Z., Majuste, D., & Mansur, M. B. (2009). Hydrometallurgical separation of aluminium, cobalt, copper and lithium from spent Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 187(1), 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.10.077>
101. Ferrell, J. E. (1985). Lithium. In 1985 U.S. Government Printing Office (Ed.), *Mineral Facts and Problems* (pp. 465–470).
102. Figueroa, R. I., Goulart Cruz, F., Furtado de Carvalho, R., Pereira Leite, F. P., & De Miranda Chaves, M. das G. A. (2014). Rehabilitation of Anterior Teeth with Ceramic Lithium Disilicate System. *International Journal of Odontostomatology*, 8, 469–474. <https://doi.org/10.4067/S0718-381X2014000300023>
103. Forbes. (2016). *Radioactive Diamond Batteries: Making Good Use Of Nuclear Waste*. <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2016/12/09/radioactive-diamond-batteries-making-good-use-of-nuclear-waste/?sh=350b8a93a044>
104. Forbes. (2020). *Tesla (TSLA)*. <https://www.forbes.com/companies/tesla/#46488ce448d4>
105. Forbes. (2021). *Lithium Shortage May Stall Electric Car Revolution And Embed China's Lead: Report*.
106. Forbes Staff. (2015). *La fórmula secreta de la innovación de Tesla*. <https://www.forbes.com.mx/la-formula-secreta-de-la-innovacion-de-tesla/>
107. Fourest, E., & Roux, J.-C. (1992). Heavy metal biosorption by fungal mycelial by-products: mechanisms and influence of pH. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 37(3), 399–403. <https://doi.org/10.1007/BF00211001>
108. Fowler, T. A., Holmes, P. R., & Crundwell, F. K. (1999). Mechanism of pyrite dissolution in the presence of Thiobacillus ferrooxidans. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(7), 2987–2993. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2987-2993.1999>
109. Freitas, M. B. J. G., & García, E. M. (2007). Electrochemical recycling of cobalt from cathodes of spent lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 171(2), 953–959. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.07.002>
110. Fu, X., Chang, K., Li, B., Tang, H., Shangguan, E., & Chang, Z. (2017). Low-temperature synthesis of LiMnPO₄/RGO cathode material with excellent voltage platform and cycle performance. *Electrochimica Acta*, 225, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.161>
111. Fukuda, H. (2019). *Lithium extraction from brine with ion exchange resin*

- and ferric phosphate. UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.
112. Gadd, G. M., Bahri-Esfahani, J., Li, Q., Rhee, Y. J., Wei, Z., Fomina, M., & Liang, X. (2014). Oxalate production by fungi: significance in geomycology, biodeterioration and bioremediation. *Fungal Biology Reviews*, 28(2), 36–55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbr.2014.05.001>
 113. Gallagher, K. G., & Nelson, P. A. (2014). Manufacturing Costs of Batteries for Electric Vehicles. In *Lithium-Ion Batteries* (pp. 97–126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00006-6>
 114. Garcés, A., Agudelo, L., Macías, K., & Salinas, N. (2006). Aislamiento de consorcio de microorganismos degradadores de cianuro. *Revista Lasallista de Investigación*, 3, 7–12.
 115. García-Gil, A., Vázquez-Suñe, E., Ayora, C., Tore, C., Henríquez, Á., & Yáñez, J. (2019). Impacts of the transient skin effect during brine extraction operations in a crystalline halite aquifer. *Journal of Hydrology*, 577, 123912. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123912>
 116. García Bello, D. (2020). *Así funcionan las baterías de litio*. <https://culturacientifica.com/2020/02/20/asi-funcionan-las-baterias-de-litio/>
 117. García, G. (2017). *Tesla recibe la patente de las baterías de metal aire*. <https://movilidadeléctrica.com/baterias-de-metal-aire/>
 118. García, G. (2018). *Iridium EV, la primera autocaravana eléctrica llegará al mercado en 2019*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/mercado/iridium-ev-primera-autocaravana-electrica-llegara-mercado-2019/20181208193114023795.html>
 119. García, G. (2020). *¿Por qué las baterías de litio-metal son mejores que las de iones de litio?* <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/baterias-litio-metal-mejores-iones-litio/20200522085806035328.html>
 120. Garrett, D. E. (2004). *Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-276152-2.X5035-X>
 121. Garside, M. (2020). *Lithium carbonate price 2010-2019*. <https://www.statista.com/statistics/606350/battery-grade-lithium-carbonate-price/>
 122. Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., Heegn, H., & Rutz, M. (2012). Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 207, 173–182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.152>
 123. GHD. (2018). *Greenbushes Lithium Mine Expansion*.
 124. Giaveno, M., Lavallo, T. L., & Donati, E. (2000). *USO DE BIORREACTORES PARA LA LIXIVIACIÓN DE UN MINERAL OXIDADO*.
 125. Godfrey, L., & Álvarez-Amado, F. (2020). Volcanic and Saline Lithium Inputs to the Salar de Atacama. *Minerals*, 10(2), 201. <https://doi.org/10.3390/min10020201>
 126. Golmohammadzadeh, R., Rashchi, F., & Vahidi, E. (2017). Recovery of lithium and cobalt from spent lithium-ion batteries using organic acids: Process optimization and kinetic aspects. *Waste Management*, 64, 244–254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.037>
 127. González, L. (2013). *Baterías de ion-sodio*. <https://forococheelectricos.com/2013/03/baterias-de-ion-sodio.html>
 128. Goodenough, J. B., Whittingham, M. S., & Yoshino, A. (2020). Lithium-Ion Batteries. In *The Royal Swedish Academy of Sciences*. <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-chemistryprize2019.pdf>
 129. Graber, T. A., Morales, J. W., Robles, P. A., Galleguillos, H. R., & Taboada, M. E. (2008). Behavior of LiOH-H₂O crystals obtained by evaporation and by drowning out. *Crystal Research and Technology*, 43(6), 616–625. <https://doi.org/10.1002/crat.200711110>
 130. Grágeda, M., González, A., Alavia, W., & Ushak, S. (2015). Development and optimization of a modified process for producing the battery grade LiOH: Optimization of energy and water consumption. *Energy*, 89, 667–677. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.025>
 131. Grasso, M., Pinna, E., González, J., & Rodríguez, M. (2016). Estudio Cinético Preliminar de la Lixiviación de LiCoO₂ con HNO₃. In *XIII Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales*.
 132. Gray, H. B. (1994). *Chemical Bonds: An introduction to atomic and molecular structure*.
 133. Gregersen, E. (2020). *Yoshino Akira*. <https://www.britannica.com/biography/Yoshino-Akira>
 134. Gregersen, E., & Schreiber, B. A. (2020). *Tesla, Inc. American Company*. <https://www.britannica.com/topic/Tesla-Motors>
 135. Grew, E. S., Jonsson, E., & Langhof, J. (2018). *Lithium – 200 Years: Meeting Report*.
 136. Grijalva, M. P. (2017). Tesla Motors: planteando estrategias originales. *Iuris Dictio*, 55–60. <https://doi.org/10.18272/ii.v19i19.900>
 137. Gutiérrez, D. (2019). *Tesla presenta su nuevo tejado solar, el Solar Glass, y es un 40% más barato que antes*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/precio-tejado-solar-tesla-solar-glass/20191028124105031111.html>
 138. Gutiérrez, E., & Troyani, N. (2004). Determinación De La Distribución De Temperatura Mediante El Método De Sustitución De Dominio En El Lecho De Las Celdas De Reducción De Aluminio Del Tipo Hall-Heroult. In *Mecánica Computacional* (pp. 2381–2390).
 139. Gutiérrez, G. (2018). *ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN DE LITIO PARA SALMUERAS DE SQM SALAR* [Universidad de Concepción]. http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3595/4/tesis_Alternativas_de_extraccion_de_litio.Image.Marked.pdf
 140. Habashi, F. (1980). *Principles of extractive metallurgy*.
 141. Habashi, F. (1997). *Handbook of Extractive Metallurgy* (Wiley-VCH).
 142. Habashi, F. (2013). Lithium, Physical and Chemical Properties. In *Encyclopedia of Metalloproteins* (pp. 1222–1223). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1533-6_345
 143. Hamzaoui, A. H., M'nif, A., Hammi, H., & Rokbani, R. (2003). Contribution to the lithium recovery from brine. *Desalination*, 158(1–3), 221–224. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00455-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00455-7)
 144. Hanisch, C., Loellhoeffel, T., Diekmann, J., Markley, K. J., Haselrieder, W., & Kwade, A. (2015). Recycling of lithium-ion batteries: a novel method to separate coating and foil of electrodes. *Journal of Cleaner Production*, 108, 301–311. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.026>
 145. Harris, D. C. (2001). *Análisis Químico Cuantitativo*.
 146. He, L.-P., Sun, S.-Y., Song, X.-F., & Yu, J.-G. (2015). Recovery of cathode materials and Al from spent lithium-ion batteries by ultrasonic cleaning. *Waste Management*, 46, 523–528. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.035>

147. Heidari, N., & Momeni, P. (2017). Selective adsorption of lithium ions from Urmia Lake onto aluminum hydroxide. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 551. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6885-1>
148. Helman, C. (2015). *Why Tesla's Powerwall Is Just Another Toy For Rich Green People*. <https://www.forbes.com/sites/christopherhelman/2015/05/01/why-teslas-powerwall-is-just-another-toy-for-rich-green-people/#708d321c46e4>
149. Höland, W., Apel, E., Van t' Hoen, C., & Rheinberger, V. (2006). Studies of crystal phase formations in high-strength lithium disilicate glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353, 38–39. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.06.039>
150. Höland, Wolfram, & Rheinberger, V. M. (2019). Glass-Ceramic Dental Restorations. In *Bone Repair Biomaterials* (pp. 457–468). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102451-5.00012-3>
151. Holmes, D. S. (2008). Review of International Biohydrometallurgy Symposium, Frankfurt, 2007. *Hydrometallurgy*, 92(1), 69–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.01.003>
152. Hong, S. Y., Kim, Y., Park, Y., Choi, A., Choi, N.-S., & Lee, K. T. (2013). Charge carriers in rechargeable batteries: Na ions vs. Li ions. *Energy & Environmental Science*, 6(7), 2067. <https://doi.org/10.1039/c3ee40811f>
153. Horeh, N. B., Mousavi, S. M., & Shojaosadati, S. A. (2016). Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*. *Journal of Power Sources*, 320, 257–266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.104>
154. Housecroft, C., & Sharp, A. G. (2006). *QUÍMICA INORGÁNICA*.
155. Hsu, C.-H., & Harrison, R. G. (1995). Bacterial leaching of zinc and copper from mining wastes. *Hydrometallurgy*, 37(2), 169–179. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00051-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00051-4)
156. Hu, J., Zhang, J., Li, H., Chen, Y., & Wang, C. (2017). A promising approach for the recovery of high value-added metals from spent lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 351, 192–199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.093>
157. Hu, X., Zou, C., Zhang, C., & Li, Y. (2017). Technological Developments in Batteries: A Survey of Principal Roles, Types, and Management Needs. *IEEE Power and Energy Magazine*, 15(5), 20–31. <https://doi.org/10.1109/MPE.2017.2708812>
158. Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (2001). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*.
159. Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design*.
160. Igsa Consultores. (2005). *Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama*. https://www.e-seia.cl/externos/admin_seia_web/archivos/6324_2005_1_10_PE.pdf
161. Infogram. (2020). *Lithium Ion Batteries and Electric Cars*. <https://infogram.com/lithium-ion-battery-info-graphic-1hdw2jOk9dzx610>
162. Intaranont, N., García-Aráez, N., Hector, A. L., Milton, J. A., & Owen, J. R. (2014). Selective lithium extraction from brines by chemical reaction with battery materials. *J. Mater. Chem. A*, 2(18), 6374–6377. <https://doi.org/10.1039/C4TA01101E>
163. International Energy Agency. (2020). *Global EV Outlook 2020*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
164. INTI. (2013). *Gestión de pilas y baterías eléctricas en Argentina*. In *Dirección de Comunicación del INTI*.
165. Investing. (2022). *Raw materials*. <https://es.investing.com/commodities/>
166. iRocks. (2021). *Triphane*. <https://www.irocks.com/minerals/specimen/44856>
167. Ishihara, T. (2014). Lithium-Air Battery. In *Encyclopedia of Applied Electrochemistry* (pp. 1188–1193). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5_438
168. Jaskula, B. W. (2017). Lithium - Worldwide production and use. In *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries* (Issue 703). <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2017-lithi.pdf>
169. Jaskula, B. W. (2018). Lithium - Worldwide production and use. In *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries* (Issue 703).
170. Jaskula, B. W. (2019). Lithium - Worldwide production and use. In *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries* (Vol. 3, Issue 703).
171. Jaskula, B. W. (2020). Lithium statistics and information. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries*, 53(9), 98–99. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
172. Jaskula, B. W. (2021). *Lithium statistics and information*. *U.S. Geological Survey, 2021*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf>
173. Jaskula, B. W. (2022). *Lithium*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-lithium.pdf>
174. Jha, M. K., Kumari, A., Jha, A. K., Kumar, V., Hait, J., & Pandey, B. D. (2013). Recovery of lithium and cobalt from waste lithium ion batteries of mobile phone. *Waste Management*, 33(9), 1890–1897. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.008>
175. Jiabao, P., Yanhai, C., & Jinyong, Y. (2015). Effect of heat treatment on the lubricating properties of lithium lubricating grease. *Royal Society of Chemistry, 5*(RSC Advances), 58686. <https://doi.org/10.1039/C5RA08917D>
176. Jordan, T. E., Muñoz, N., Hein, M., Lowenstein, T., Godfrey, L., & Yu, J. (2002). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 114(11), 1406–1421. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<1406:AFAFWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<1406:AFAFWT>2.0.CO;2)
177. Kang, J., Senanayake, G., Sohn, J.-S., & Shin, S. (2010). Recovery of cobalt sulfate from spent lithium ion batteries by reductive leaching and solvent extraction with Cyanex 272. *Hydrometallurgy*, 100, 168–171. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.010>
178. KARORA Resources. (2021). *Beta Hunt Mine*. <https://www.karoraresources.com/beta-hunt-mine>
179. Kembleton, R. (2020). Nuclear Fusion. In *Future Energy* (pp. 543–560). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00025-6>
180. Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., & Wallington, T. J. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>
181. Khan, R., Kumar, R., & Rohatgi, N. (2020). Sustainable Air-Conditioning. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* (pp. 201–218). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11465-1>
182. Kim, D.-S., Sohn, J.-S., Lee, C., Lee, J.-H., Han, K.-S., & Lee, Y.-I. (2004). Simultaneous separation and renovation of lithium cobalt oxide from the cathode of spent lithium ion rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 132, 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.046>
183. Kim, K. (2008). Recovery of Lithium Hydroxide from Spent Lithium

- Carbonate using Crystallizations. *Separation Science and Technology*, 43(2), 420–430. <https://doi.org/10.1080/01496390701784088>
184. Kim, M.-J., Seo, J.-Y., Choi, Y.-S., & Kim, G.-H. (2016). Bioleaching of spent Zn–Mn or Ni–Cd batteries by *Aspergillus* species. *Waste Management*, 51, 168–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.001>
185. Klein, B. (2022). *Biden administration making \$3 billion investment in lithium ion battery production*. <https://edition.cnn.com/2022/05/02/politics/biden-administration-lithium-batteries/index.html>
186. Klein, C., & Dutrow, B. (2007). *Manual of Mineral Science*.
187. Koch, E.-C. (2004). Special Materials in Pyrotechnics: III. Application of Lithium and its Compounds in Energetic Systems. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 29(2), 67–80. <https://doi.org/10.1002/prep.200400032>
188. Kubánková, E. (2019). *Caballeriza de Kladruby y región minera de los montes Metálicos entran en la UNESCO*. <https://espanol.radio.cz/caballeriza-de-kladruby-y-region-minera-de-los-montes-metalicos-entran-en-la-8126549>
189. Kumagai, J. (2020). The return of the lithium-metal battery. *IEEE Spectrum*, 57(1), 30–31. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2020.8946305>
190. Kumar, S. (2020). *BU-205: Types of Lithium-ion*. https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
191. Lagos, G. (2012). *El desarrollo del litio en Chile: 1984-2012*. http://www.gustavolagos.cl/uploads/1/2/4/2/12428079/el_desarrollo_del_litio_en_chile_g._lagos_21-8-12_a.pdf
192. Lain, M. J. (2001). Recycling of lithium ion cells and batteries. *Journal of Power Sources*, 97–98, 736–738. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00600-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00600-0)
193. Lambert, F. (2020). *Tesla has a new product: Autobidder, a step toward becoming an electric utility*. <https://electrek.co/2020/05/03/tesla-autobidder-new-product-electric-utility/>
194. Le Baron, I. M. (1945). *US Patent 2,381,219, 1945-08-07*.
195. Lee, C. K., & Rhee, K.-I. (2002). Preparation of LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 109(1), 17–21. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00037-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00037-X)
196. Lee, D. (2019). *Tesla: el vergonzoso lanzamiento del “Cybertruck” de Elon Musk*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50519466>
197. Li, Jia, Wang, G., & Xu, Z. (2016). Environmentally-friendly oxygen-free roasting/wet magnetic separation technology for in situ recycling cobalt, lithium carbonate and graphite from spent LiCoO₂/graphite lithium batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 302, 97–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.050>
198. Li, Jinhui, Shi, P., Wang, Z., Chen, Y., & Chang, C.-C. (2009). A combined recovery process of metals in spent lithium-ion batteries. *Chemosphere*, 77(8), 1132–1136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.040>
199. Li, L., Lu, J., Ren, Y., Zhang, X. X., Chen, R. J., Wu, F., & Amine, K. (2012). Ascorbic-acid-assisted recovery of cobalt and lithium from spent Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 218, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.068>
200. Li, Lei, Zeng, G., Luo, S., Deng, X., & Xie, Q. (2013). Influences of Solution pH and Redox Potential on the Bioleaching of LiCoO₂ from Spent Lithium-ion Batteries. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 56. <https://doi.org/10.1007/s13765-013-3016-x>
201. Li, Li, Bian, Y., Zhang, X., Guan, Y., Fan, E., Wu, F., & Chen, R. (2018). Process for recycling mixed-cathode materials from spent lithium-ion batteries and kinetics of leaching. *Waste Management*, 71, 362–371. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.028>
202. Li, Li, Dunn, J. B., Zhang, X. X., Gaines, L., Chen, R. J., Wu, F., & Amine, K. (2013). Recovery of metals from spent lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment. *Journal of Power Sources*, 233, 180–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.089>
203. Li, Li, Ge, J., Chen, R., Wu, F., Chen, S., & Zhang, X. (2010). Environmental friendly leaching reagent for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries. *Waste Management*, 30(12), 2615–2621. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.008>
204. Li, Li, Qu, W., Zhang, X., Lu, J., Chen, R., Wu, F., & Amine, K. (2015). Succinic acid-based leaching system: A sustainable process for recovery of valuable metals from spent Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 282, 544–551. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.073>
205. Li, Li, Zhai, L., Zhang, X., Lu, J., Chen, R., Wu, F., & Amine, K. (2014). Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by ultrasonic-assisted leaching process. *Journal of Power Sources*, 262, 380–385. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.013>
206. Li, Z. ., & Sumathy, K. (2000). Technology development in the solar absorption air-conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(3), 267–293. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00016-7)
207. Liang, Z., Cong, G., Wang, Y., & Lu, Y.-C. (2018). Lithium-Air Battery Mediator. In *Metal-Air Batteries* (pp. 151–205). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527807666.ch7>
208. Lin, D., Liu, Y., & Cui, Y. (2017). Reviving the lithium metal anode for high-energy batteries. *Nature Nanotechnology*, 12(3), 194–206. <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.16>
209. Lin, J., Fan, C., Chang, I., & Shiu, J. (2003). *Clean process of recovering metals from waste lithium ion batteries* (Patent No. N° US 6.514.311 B1).
210. Linden, D., & Reddy, T. B. (1995). *Handbook Of Batteries* (4th ed.). McGraw-Hill.
211. LithiumAmericas. (2021). *Thacker Pass*. <https://www.lithiumamericas.com/thacker-pass/>
212. Liu, B., Zhang, J.-G., & Xu, W. (2018). Advancing Lithium Metal Batteries. *Joule*, 2(5), 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.008>
213. Liu, G., Zhao, Z., & Ghahreman, A. (2019). Novel approaches for lithium extraction from salt-lake brines: A review. *Hydrometallurgy*, 187, 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.005>
214. Liu, D., Gao, X., An, H., Qi, Y., Wang, Z., Jia, N., & Chen, Z. (2020). Exploring behavior changes of the lithium market in China: Toward technology-oriented future scenarios. *Resources Policy*, 69, 101885. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101885>
215. LKAB. (2020). *SUM - New World Standard for Sustainable Mining*. <https://www.lkab.com/en/about-lkab/technological-and-process-development/research-collaborations/new-world-standard-for-sustainable-mining/>

216. Loomis, T. A. (2021). *PEGMATITES OF THE BLACK HILLS, SOUTH DAKOTA*. <https://www.dakotamatrix.com/content/pegmatites-of-the-black-hills>
217. Lovera, J. A., Graber, T. A., & Galleguillos, H. R. (2009). Correlation of solubilities for the NaCl + LiCl + H₂O system with the Pitzer model at 15, 25, 50, and 100°C. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 33(2), 388–392. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2008.11.002>
218. Lucas, J. (2016). *Beta Hunt debt deal near*. <https://www.kalminer.com.au/news/goldfields/beta-hunt-debt-deal-near-ng-ya-117647>
219. Ma, G., Chen, Y., Xia, L., Zhan, Y., Zhong, B., Yang, H., Huang, L., Xiong, L., Huang, X., & Wen, G. (2020). Mechanical and thermal properties of Graphene nanoplates (GNPs) / Lithium aluminosilicate (LAS) composites: An analysis based on mathematical model and experiments. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.104>
220. Ma, G., Xia, L., Zhang, T., Zhong, B., Yang, H., Xiong, L., & Huang, L. (2020). Permeability and thermal expansion properties of porous LAS ceramic prepared by gel-casting method. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(9), 3462–3468. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.056>
221. Ma, L., Nie, Z., xi, X., & Han, X. (2013). Cobalt recovery from cobalt-bearing waste in sulphuric and citric acid systems. *Hydrometallurgy*, 136, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.01.016>
222. Macduffie, J. P. (2018). Response to Perkins and Murmann: Pay Attention to What Is and Isn't Unique about Tesla. *Management and Organization Review*, 14, 481–489. <https://doi.org/10.1017/mor.2018.32>
223. Mack, C., Wilhelm, B., Duncan, J. R., & Burgess, J. E. (2007). Biosorption of precious metals. *Biotechnology Advances*, 25(3), 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.01.003>
224. Magalini, F., Kuehr, R., & Baldé, C. P. (2015). eWaste en América Latina. *GSMA Latin America*, 45.
225. Mantuano, D., Dorella, G., Elias, R., & Mansur, M. (2006). Analysis of a hydrometallurgical route to recover base metals from spent rechargeable batteries by liquid-liquid extraction with Cyanex 272. *Journal of Power Sources*, 159, 1510–1518. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.056>
226. Marazuela, M. A., Ayora, C., Vázquez-Suñé, E., Olivella, S., & García-Gil, A. (2020). Hydrogeological constraints for the genesis of the extreme lithium enrichment in the Salar de Atacama (NE Chile): A thermohaline flow modelling approach. *Science of The Total Environment*, 739, 139959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139959>
227. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Custodio, E., Palma, T., García-Gil, A., & Ayora, C. (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). *Journal of Hydrology*, 561, 223–235. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.010>
228. Martin, G., Rentsch, L., Höck, M., & Bertau, M. (2017). Lithium market research – global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials*, 6, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.11.004>
229. Martin, S. L. D., Diaz, N. G., & Frades, T. M. (2009). *Mixing and settling method and device in solvent extraction processes to recover high-purity products*.
230. Mauger, A., & Julien, C. (2018). Olivine Positive Electrodes for Li-Ion Batteries: Status and Perspectives. *Batteries*, 4(3), 39. <https://doi.org/10.3390/batteries4030039>
231. McAlister, A. J. (1982). *The Al - Li (Aluminum - Lithium) system*. *Journal of Phase Equilibria*, 3 (2), pp. 177-183.
232. McFarland, M. (2020). *Tesla's latest Autopilot feature is slowing down for green lights, too*. <https://edition.cnn.com/2020/04/27/tech/tesla-autopilot-stoplight/index.html>
233. MCH. (2021). *Vicepresidente de Finanzas de SQM atribuye rally alcista de las acciones a positivas perspectivas para el mercado de autos eléctricos*. <https://www.mch.cl/2021/01/08/vicepresidente-de-finanzas-de-sqm-atribuye-rally-alcista-de-las-acciones-a-positivas-perspectivas-para-el-mercado-de-autos-electricos/>
234. McKnight, R. F., Adida, M., Budge, K., Stockton, S., Goodwin, G. M., & Geddes, J. R. (2012). Lithium toxicity profile: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet*, 379(9817), 721–728. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61516-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61516-X)
235. McLanahan. (2021). *DDC-Sizers*. <https://www.mclanahan.com/products/ddc-sizers>
236. McLaughlin, W. (1994). *Method for the neutralization of hazardous materials* (Patent No. N° US 5.345.033).
237. McMahon, J. (2015). *Elon Musk: Tesla Powerpack Doesn't Need Renewables, Battery Market "Staggeringly Gigantic."* <https://www.forbes.com/sites/jeffmcmahon/2015/08/05/elon-musk-tesla-powerpack-doesnt-need-renewables-battery-market-staggeringly-gigantic/#5df5716631bb>
238. Meng, F., McNeice, J., Zadeh, S. S., & Ghahreman, A. (2021). Review of Lithium Production and Recovery from Minerals, Brines, and Lithium-Ion Batteries. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 42(2), 123–141. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1668387>
239. Merino, A. (2017). *Ciclos de carga, ¿qué son? ¿Se pueden recuperar? Desde aquí podrás resolver tus dudas*. <https://lamanzanamordida.net/ciclos-de-carga/>
240. Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy*, 150, 192–208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012>
241. Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2015a). Hydrometallurgical processing of spent lithium ion batteries (LIBs) in the presence of a reducing agent with emphasis on kinetics of leaching. *Chemical Engineering Journal*, 281, 418–427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.071>
242. Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2015b). Recovery of valuable metals from cathodic active material of spent lithium ion batteries: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management*, 45, 306–313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.027>
243. Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 12(6), 1074. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
244. Miller, G. (2020). *Lithium special report* (Issue April).
245. Mindat. (2020a). *Amblygonite*. <https://www.mindat.org/photo-873881.html>
246. Mindat. (2020b). *Eucryptite*. <https://www.mindat.org/min-1419.html>
247. Mindat. (2020c). *Hectorite*. <https://www.mindat.org/loc-51563.html>
248. Mindat. (2020d). *Hiddenite*. <https://www.mindat.org/photo-21687.html>

249. Mindat. (2020e). *Jadarite*. <https://www.mindat.org/loc-144296.html>
250. Mindat. (2020f). *Lepidolite*. <https://www.mindat.org/photo-76777.html>
251. Mindat. (2020g). *Lepidolite*. <https://www.mindat.org/photo-112820.html>
252. Mindat. (2020h). *Petalite*. <https://www.mindat.org/photo-1028004.html>
253. Mindat. (2020i). *Petalite*. <https://www.mindat.org/photo-332775.html>
254. Mindat. (2020j). *Spodumene*. <https://www.mindat.org/gallery.php?loctxt=Walnut+Hill+Pegmatite&min=3733>
255. Minería Chilena. (2019). *Minería y electromovilidad: La mirada alemana sobre una provechosa relación*. <https://www.mch.cl/2019/10/30/mineria-y-electromovilidad-la-mirada-alemana-sobre-una-provechosa-relacion/#>
256. Mining Technology. (2017). *Rio Tinto signs MoU with Serbia to develop Jadar lithium-borate project*. <https://www.mining-technology.com/marketdata/newsrio-tinto-signs-mou-with-serbia-to-develop-jadar-lithium-borate-project-5881303/>
257. Mining Technology. (2021). *Altura's Pilgangoora Lithium Project*. <https://www.mining-technology.com/projects/alturas-pilgangoora-lithium-project/>
258. MiningJournal. (2020). *Livent to raise US\$225M in green bonds*. <https://www.mining-journal.com/energy-minerals-news/news/1389427/livent-to-raise-ususd225m-in-green-bonds>
259. Ministerio Ambiente Gobierno Argentino. (2020). *Gestión integral de residuos*.
260. Mishra, D., Kim, D.-J., Ralph, D. E., Ahn, J.-G., & Rhee, Y.-H. (2008). Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Waste Management*, 28(2), 333–338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.010>
261. Moreno, A. (2016). *Metalurgia del Aluminio*.
262. Morse, E. C. (2020). Nuclear Fusion. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (pp. 1–9). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12177-3>
263. Motock, G. T. (1946). Extraction and uses of lithium in Germany. In 1946 U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines (Ed.), *Information Circular, Números 7360-7369* (pp. 1–23).
264. Mukhopadhyay, A., & Jangid, M. K. (2018). Li metal battery, heal thyself. *Science*, 359(6383), 1463–1463. <https://doi.org/10.1126/science.aat2452>
265. Munk, L. A., Boutt, D. F., Hynek, S., & Moran, B. (2018). Hydrogeochemical Fluxes and Processes Contributing to the Formation of Lithium-Enriched Brines in a Hyper-Arid Continental Basin. *Chemical Geology*, 493, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.013>
266. Munk, L. A., Hynek, S. A., Bradley, D. C., Boutt, D., Labay, K., & Jochens, H. (2016). Lithium Brines: A Global Perspective. In *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits* (pp. 1–9). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/Rev.18.14>
267. Muñoz-Pardo, J. F., Ortiz-Astete, C. A., Mardones-Pérez, L., & Vidts-Sabelle, P. de. (2004). Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, XIX, 69–81.
268. Murodjon, S., Yu, X., Li, M., Duo, J., & Deng, T. (2020). Lithium Recovery from Brines Including Seawater, Salt Lake Brine, Underground Water and Geothermal Water. In *Thermodynamics and Energy Engineering*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90371>
269. Musk, E. (2006). *The Secret Tesla Motors Master Plan (just between you and me)*. <https://www.tesla.com/blog/secret-tesla-motors-master-plan-just-between-you-and-me>
270. Musk, E. (2014a). *All Our Patent Are Belong To You*. <https://www.tesla.com/blog/all-our-patent-are-belong-you>
271. Musk, E. (2014b). *Nevada Selected As Official Site for Tesla Battery Gigafactory*. <https://www.tesla.com/blog/nevada-selected-official-site-tesla-battery-gigafactory>
272. Musk, E. (2016). *Master Plan, Part Deux*. <https://www.tesla.com/blog/master-plan-part-deux>
273. Myoung, J., Jung, Y., Lee, J., & Tak, Y. (2002). Cobalt oxide preparation from waste LiCoO₂ by electrochemical-hydrothermal method. *Journal of Power Sources*, 112(2), 639–642. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00459-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00459-7)
274. Nan, J., Han, D., Yang, M., Cui, M., & Hou, X. (2006). Recovery of metal values from a mixture of spent lithium-ion batteries and nickel-metal hydride batteries. *Hydrometallurgy*, 84, 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.059>
275. Nan, J., Han, D., & Zuo, X. (2005). Recovery of metal values from spent lithium-ion batteries with chemical deposition and solvent extraction. *Journal of Power Sources*, 152, 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.134>
276. NATIONAL GEOGRAPHIC. (2019). *Litio, el oro del siglo XXI*. <https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/grandes-reportajes/litio-oro-siglo-xxi.13875/4>
277. Nayaka, G P, Manjanna, J., Pai, K. V, Vadavi, R., Keny, S. J., & Tripathi, V. S. (2015). Recovery of valuable metal ions from the spent lithium-ion battery using aqueous mixture of mild organic acids as alternative to mineral acids. *Hydrometallurgy*, 151, 73–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.11.006>
278. Nayaka, G P, Pai, K. V, Santhosh, G., & Manjanna, J. (2016). Recovery of cobalt as cobalt oxalate from spent lithium ion batteries by using glycine as leaching agent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 2378–2383. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.04.016>
279. Nayaka, Girish Praveen, Pai, K. V., Manjanna, J., & Keny, S. J. (2016). Use of mild organic acid reagents to recover the Co and Li from spent Li-ion batteries. *Waste Management*, 51, 234–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.008>
280. Nayl, A. A., Elkhashab, R. A., Badawy, S. M., & El-Khateeb, M. A. (2017). Acid leaching of mixed spent Li-ion batteries. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3632–S3639. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.04.001>
281. Nitum. (2012). *Biography of Carl Gassner*. <https://nitum.wordpress.com/2012/09/28/biography-of-carl-gassner/>
282. NDB. (2022). NDB Cell. <https://ndb.technology/>
283. Niu, Z., Zou, Y., Xin, B., Chen, S., Liu, C., & Li, Y. (2014). Process controls for improving bioleaching performance of both Li and Co from spent lithium ion batteries at high pulp density and its thermodynamics and kinetics exploration. *Chemosphere*, 109, 92–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02.059>
284. Nizam, M., Maghfiroh, H., Rosadi, R. A., & Kusumaputri, K. D. U. (2019). Design of Battery Management System (BMS) for Lithium

- Iron Phosphate (LFP) Battery. 2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), 170–174. <https://doi.org/10.1109/ICEVT48285.2019.8994002>
285. Nogales, D. (2021). SQM aprueba gigantesca inversión para desarrollar proyecto de litio en Australia. <https://www.latercera.com/pulso/noticia/sqm-aprueba-millonaria-inversion-para-extraer-litio-en-australia/YKZHZYSMEJB2PDPNJB2ZHXFZM>
286. Normile, D. (2017). Tesla to build titanic battery facility. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.aan7072>
287. O’Kane, S. (2020). Tesla sold more cars in 2019 than in the previous two years combined. <https://www.theverge.com/2020/1/3/21047233/tesla-2019-deliveries-q4-record-model-3-sales>
288. Olivera, R., Dueñas, A., Yapo, U., Almanza, M., Manuel, D., Rivera, A. M., Mogrovejo-Medina, G., Taco-Cervantes, H., & Esparza, M. (2017). Biolixiviación de mineral cuarzo por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en reactor de columna por gravedad. *Revista de Metalurgia*, 53, 96. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.096>
289. Omar, N., Firouz, Y., Monem, M. A., Samba, A., Gualous, H., Coosemans, T., Van den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2014). Analysis of Nickel-Based Battery Technologies for Hybrid and Electric Vehicles. In *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.10740-1>
290. Osaka, T., & Ogumi, Z. (2014). *Nanoscale Technology for Advanced Lithium Batteries* (T. Osaka & Z. Ogumi (Eds.)). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8675-6>
291. Otero, L., & Queirolo, M. (2006). *Sistemas redox*. http://dec.fq.edu.uy/catedra_inorganica/general2/biblio16.pdf
292. Ou, X., Sun, X., Zhao, Q., & Fan, F. (2005). Progress in recovery technology of waste lithium-ion battery. *Chinese Inorg. Chem. Ind.*, 37, 11–14.
293. Pak, S. J., Seo, I., Lee, K. Y., & Hyeong, K. (2019). Rare earth elements and other critical metals in deep seabed mineral deposits: Composition and implications for resource potential. *Minerals*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/min9010003>
294. Park, K.-Y., Kim, H., Lee, S., Kim, J., Hong, J., Lim, H.-D., Park, I., & Kang, K. (2016). Thermal structural stability of a multi-component olivine electrode for lithium ion batteries. *CrystEngComm*, 18(39), 7463–7470. <https://doi.org/10.1039/C6CE00944A>
295. Park, S.-J., Kim, M. Y., Lim, J.-S., Kang, B.-S., Kim, Y.-A., Hong, Y. S., Kim, H. C., & Kim, H.-S. (2020). Effects of LiFSI and LMO-Coated NCM on Capacity and Cycle Characteristics of All-Solid Lithium Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9), 090551. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab9a06>
296. Paulino, J. F., Busnardo, N. G., & Afonso, J. C. (2008). Recovery of valuable elements from spent Li-batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 843–849. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.048>
297. Pedrosa, G., & Nobre, H. (2019). The influence of consumer mobility concerns on electric vehicle adoption. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 8, 366–390. <https://doi.org/10.1504/writr.2019.10024867>
298. Peng, S., & Ilango, P. R. (2020). Electrospinning of Nanofibers for Na-Ion Battery. In *Electrospinning of Nanofibers for Battery Applications* (pp. 61–83). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1428-9_3
299. Pérez, W., Bravo, H. A. C. B., Suárez, C., & Bravo, M. (2014). *Method for the production of battery grade lithium carbonate from natural and industrial brines* (Patent No. US 8,691,169 B2).
300. Perkins, G., & Murmann, J. (2018). What Does the Success of Tesla Mean for the Future Dynamics in the Global Automobile Sector? *Management and Organization Review*, 14, 471–480. <https://doi.org/10.1017/mor.2018.31>
301. Pflazner, S. (2006). *An Introduction to Inertial Confinement Fusion (Plasma Physics)*.
302. PHOENIX. (2021). *Attrition Cell Scrubbers*. <https://www.dewater.com/attrition-scrubbers/>
303. Pickens, J. R. (1990). Review Recent developments in the weldability of lithium-containing aluminurn alloys. *Journal of Materials Science*, 25, 3035–3047.
304. Pilbara Minerals. (2019). 2019 ANNUAL REPORT.
305. Pilbara Minerals. (2021). PILGANGOORA LITHIUM-TANTALUM PROJECT.
306. Pinna, E., Ruiz, M., Ojeda, M., & Rodríguez, M. (2017). Cathodes of spent Li-ion batteries: Dissolution with phosphoric acid and recovery of lithium and cobalt from leach liquors. *Hydrometallurgy*, 167, 66–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.024>
307. Pinna, E., Zeballos, C., Ojeda, M., & Rodríguez, M. (2014). Extracción de Li y Co de Baterías Ion-Litio Agotadas con la Mezcla H6C4O6-H2O2. In *XII Jornadas Argentinas de Tratamientos de Minerales*.
308. Pinna, E., Martínez, A. A., Tunez, F. M., Drailin, D. S., & Rodríguez, M. H. (2019). ACID LEACHING OF LiCoO2 FROM LIBS: THERMODYNAMIC STUDY AND REDUCING AGENT EFFECT. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(2), 441–449. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revme-xingquim/2019v18n2/Pinna>
309. Pinna, E., Drajlín, D. S., Toro, N., & Rodríguez, M. H. (2020). Kinetic modeling of the leaching of LiCoO2 with phosphoric acid. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 14017–14028. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.109>
310. Pinna, E., Toro, N., Gallegos, S., & Rodríguez, M. H. (2021). A Novel Recycling Route for Spent Li-Ion Batteries. *Materials*, 15(1), 44. <https://doi.org/10.3390/ma15010044>
311. Poullikkas, A. (2013). A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 778–788. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.017>
312. Pranolo, Y., Zhang, W., & Cheng, C. Y. (2010). Recovery of metals from spent lithium-ion battery leach solutions with a mixed solvent extractant system. *Hydrometallurgy*, 102(1), 37–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.007>
313. Purkayastha, R. (2019). Degradation in Lithium-Sulfur Batteries. In *Lithium-Sulfur Batteries* (pp. 185–226). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119297895.ch7>
314. Ramos Penabad, L. (2012). *Así resucitó la batería de Thomas Edison de 1901*. <https://noticias.coches.com/noticias-motor/resucita-la-bateria-de-thomas-edison-de-1901/55063>
315. Randau, S., Weber, D. A., Kötz, O., Koerper, R., Braun, P., Weber, A., Ivers-Tiffée, E., Adermann, T., Kulisch, J., Zeier, W. G., Richter, F. H.,

- & Janek, J. (2020). Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries. *Nature Energy*, 5(3), 259–270. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0565-1>
316. Rapier, R. (2022). *How The U.S. Is Losing The Lithium Industry To China*. <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2022/01/11/the-us-is-losing-the-lithium-industry-to-china/?sh=d7fb7516a15c>
317. Rayner-Canham, G. (2000). *Química Inorgánica Descriptiva*.
318. *RD energía*. (2019). *Oficina de Energía Nuclear Fisión y Fusión ¿Cuál es la diferencia?* <https://revistardenergia.com/oficina-de-energia-nuclear-fision-y-fusion-cual-es-la-diferencia/>
319. Reddy, G. M., & Gokhale, A. A. (2014). Welding Aspects of Aluminum & Lithium Alloys. In *Aluminum-Lithium Alloys*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401698-9.00009-4>
320. Reddy, S. S. (2015). *History of Batteries*. <https://herculespowerenergy.wordpress.com/2015/10/20/history-of-batteries/>
321. Retamal, P. (1999). Lito y enfermedad bipolar. *Revista Médica de Chile*, 127(10). <https://doi.org/10.4067/S0034-98871999001000017>
322. REUTERS. (2018). *China's Ganfeng buys SQM's stake in lithium project for \$87.5 mln*. <https://www.reuters.com/article/sqm-ganfeng-lithium-idUS-L1N1V500C>
323. REUTERS. (2020a). *Chilena SQM dice firma acuerdo largo plazo con LG para suministro de litio*. <https://www.reuters.com/article/mineria-chile-sqm-idLTAKBN28W1BQ>
324. REUTERS. (2020b). *Ganancias de SQM caen por baja continua en precio del litio*. <https://www.economista.es/empresas-eAm-chile/noticias/10394372/03/20/Ganancias-de-SQM-caen-por-baja-continua-en-precio-del-litio.html>
325. REUTERS. (2020c). *SQM anuncia un acuerdo de suministro de litio con LG Energy Solution*. <https://www.worldenergytrade.com/metales/litio/sqm-anuncia-un-acuerdo-de-suministro-de-litio-con-lg-energy-solution>
326. Reutter, K.-J., Charrier, R., Götzte, H.-J., Schurr, B., Wigger, P., Scheuber, E., Giese, P., Reuther, C.-D., Schmidt, S., Rietbrock, A., Chong, G., & Belmonte-Pool, A. (2006). *The Salar de Atacama Basin: a Subsiding Block within the Western Edge of the Altiplano-Puna Plateau* (pp. 303–325). https://doi.org/10.1007/978-3-540-48684-8_14
327. *Revista Energía*. (2020). *Aire acondicionado 100% ecológico, funciona con energía solar*.
328. Rioja, R. J., & Liu, J. (2012). The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43, 3325–3337. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1155-z>
329. Rochow, E. G. (2008). *QUÍMICA INORGÁNICA*.
330. Rodríguez, M., Pinna, E., Zeballos, C., & Suárez, D. (2018). *Method for the Acid Dissolution of LiCo2O Contained in Spent Lithium Ion Batteries*. (Patent No. N° US 2018/0309174).
331. Rosero, P., & Peluffo, D. (2016). *Fundamentos de Electrónica Básica: Manejo y configuración de diodos y transistores*.
332. RTM. (2016). *Energía nuclear a partir de Litio*. <http://www.revistatecnico-mineros.com/2016/04/energia-nuclear-a-partir-de-litio/>
333. S&P Global. (2019). *Why lithium has turned from gold to dust for investors*. <https://www.spglobal.com/en/research-insights/articles/why-lithium-has-turned-from-gold-to-dust-for-investors>
334. S&P Global. (2020). *Lithium Industry: Supply and Costs Outlook*. <https://pages.marketintelligence.spglobal.com/Lithium-supply-and-costs-outlook-confirmation-CD-2019-MS.html?alid=eyJpIjoiaRmd3TW9qUVdnN0pYcnphcSlsIn-QiOiJaTkZFaZiV290MktkWHN4cmIsS0Z3PT0ifQ%253D%253D>
335. Salgado, R. M., Danzi, F., Oliveira, J. E., El-Azab, A., Camanho, P. P., & Braga, M. H. (2021). The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries. *Molecules*, 26(11), 3188. <https://doi.org/10.3390/molecules26113188>
336. Sánchez, C. (2015). *De la pila de Volta al Powerwall de Elon Musk: breve historia de las baterías*. https://www.eldiario.es/hojaderouter/ciencia/bateria-pila-historia-tesla-powerwall_1_2671125.html
337. Sarbu, I., & Dorca, A. (2018). A comprehensive review of solar thermoelectric cooling systems. *International Journal of Energy Research*, 42(2), 395–415. <https://doi.org/10.1002/er.3795>
338. Saunders, K. E. A., & Geddes, J. (2020). Bipolar disorder. In M. Sharpe (Ed.), *Oxford Textbook of Medicine* (pp. 6498–6501). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/med/9780198746690.003.0633>
339. SCANCIA. (2020). *Fusión de borato Los fundamentos*. <https://scancia.ca/es/fusion-de-borato/>
340. Schumm, B. (2020). *Development Of Batteries*. <https://www.britannica.com/technology/battery-electronics/Development-of-batteries>
341. Scian, A., & Rendtorff, N. (2017). LITIO EN CERÁMICOS, ESMALTES, CEMENTOS Y MATERIALES SIMILARES. In *Litio Un recurso natural estratégico* (pp. 154–166).
342. Serrano, I., Osés, R., Canflanca, B., Lagos, M., Caño, M., Fernández, S., & Ferreiro, S. (2012). *Materiales metálicos de uso frecuente en aeronáutica: aleaciones ligeras Al-Li*. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101138-Materiales-metalicos-de-uso-frecuente-en-aeronautica-aleaciones-ligeras-Al-Li.html>
343. Shen, Y. (2002). Recovery cobalt from discarded lithium ion cells. *Chinese Nonferrous Metals*, 54.
344. Sheridan, E. T., & Berte, V. C. (1962). Fuel-Briquet and Packaged-Fuel plants in the United States in 1960. In 1962 U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines (Ed.), *Information Circular, Números 8048-8055* (pp. 1–5).
345. Shin, S. M., Kim, N. H., Sohn, J. S., Yang, D. H., & Kim, Y. H. (2005). Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes. *Hydrometallurgy*, 79(3), 172–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.06.004>
346. Shirazi, A., Taylor, R. A., Morrison, G. L., & White, S. D. (2018). Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review. *Energy Conversion and Management*, 171, 59–81. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.091>
347. Siczek, K. J. (2019). Introduction to Lithium-Sulfur Batteries. In *Next-Generation Batteries with Sulfur Cathodes* (pp. 5–13). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816392-4.00002-5>
348. Siddiqui, M. U., & Said, S. A. M. (2015). A review of solar powered absorption systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 93–115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.014>
349. Silva, R. G. da, Seckler, M., Rocha, S. D. F., Saturnino, D., & Oliveira, É. D. de. (2017). Thermodynamic modeling of phases equilibrium in aqueous systems to recover potassium chloride from natural brines. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(1), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.05.006>

350. Simmons, W. B. S., & Webber, K. L. (2008). Pegmatite genesis: state of the art. *European Journal of Mineralogy*, 20(4), 421–438. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1833>
351. Skyllas-Kazacos, M., & McCann, J. F. (2015). Vanadium redox flow batteries (VRBs) for medium- and large-scale energy storage. In *Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage* (pp. 329–386). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-013-2.00010-8>
352. SNE Research. (2022). *Battery*. <https://www.sneresearch.com/en/>
353. Soto-Bubert, A., Pozas, C. de las, Navarro, G., & Acevedo, R. (2019). *Drenaje de Salmueras en Sales de Halita*. <http://www.inglomayor.cl/edicion12/01.pdf>
354. SQM. (2021a). *Acerca de SQM*. <https://www.sqm.com/acerca-de-sqm/informacion-corporativa/nuestra-historia/>
355. SQM. (2021b). *Reporte de sustentabilidad*. <https://www.sqm.com/sustentabilidad/reportes-de-sustentabilidad/>
356. Stanley, C. J., Jones, G. C., Rumsey, M. S., Blake, C., Roberts, A. C., Stirling, J. A. R., Carpenter, G. J. C., Whitfield, P. S., Grice, J. D., & Lepage, Y. (2007). Jadarite, LiNaSiB₃O₇(OH), a new mineral species from the Jadar Basin, Serbia. *European Journal of Mineralogy*, 19(4), 575–580. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2007/0019-1741>
357. Statista. (2019). *World lithium reserves by country 2019 Published by M. Garside, Jul 3, 2020*. <https://www.statista.com/statistics/268790/countries-with-the-largest-lithium-reserves-worldwide/>
358. Sterba, J., Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Escanciano García-Miranda, C., & Fidalgo Valverde, G. (2019). Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. *Resources Policy*, 62, 416–426. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.05.002>
359. Strakowski, S. M., Almeida, J. R. C., & DelBello, M. P. (2020). Psychopharmacological Treatments for Bipolar Disorder. In *Bipolar Disorder* (pp. 191–232). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/med/9780190908096.003.0013>
360. Suárez, D., Giménez, M., Pinna, E., & Rodríguez, M. (2013). Recuperación de Li y Co a partir de los filtrados de la lixiviación ácida de LiCoO₂. *Congreso Binacional SAM: Jornadas CONAMET*.
361. Suárez, D., Pinna, E., Rosales, G., & Rodríguez, M. (2017). Synthesis of Lithium Fluoride from Spent Lithium Ion Batteries. *Minerals*, 7(5), 81. <https://doi.org/10.3390/min7050081>
362. Suárez, D., Zeballos, C., Grasso, M., & Rodríguez, M. (2014). Estudio Cinético de la Lixiviación del LiCoO₂ con HCl. In *XII Jornadas Argentinas de Tratamientos de Minerales* (pp. 307–312). XII Jornadas Argentinas de Tratamientos de Minerales.
363. Sun&Climate. (2020). *Solar heating and cooling*. <https://www.sunandclimate.com/applications/13-solar-heating-and-cooling/137-solar-cooling.html>
364. Sun, L., & Qiu, K. (2011). Vacuum pyrolysis and hydrometallurgical process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 194, 378–384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.114>
365. Sun, L., & Qiu, K. (2012). Organic oxalate as leachant and precipitant for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. *Waste Management*, 32(8), 1575–1582. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.027>
366. SVS. (2016). *HECHO ESENCIAL, Superintendencia de Valores y Seguros*. https://mineriaenlinea.com/wp-content/uploads/2016/03/hes_2016030038152.pdf
367. SVS. (2018). *HECHO ESENCIAL, Superintendencia de Valores y Seguros*. http://www.svs.cl/documentos/hes/hes_2018100184500.pdf
368. Swain, B., Jeong, J., Lee, J., & Lee, G.-H. (2006). Separation of Cobalt and Lithium from mixed sulphate solution using Na-CYANEX 272. *Hydrometallurgy*, 84, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.061>
369. Swain, B., Jeong, J., Lee, J., Lee, G.-H., & Sohn, J.-S. (2007). Hydrometallurgical process for recovery of cobalt from waste cathodic active material generated during manufacturing of lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 167(2), 536–544. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.046>
370. Taboada, M. E., Graber, T. A., Cisternas, L. A., Cheng, Y. S., & Ng, K. M. (2007). Process Design for Drowning-Out Crystallization of Lithium Hydroxide Monohydrate. *Chemical Engineering Research and Design*, 85(9), 1325–1330. <https://doi.org/10.1205/cherd06251>
371. Tadesse, B., Makuei, F., Albjanic, B., & Dyer, L. (2019). The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review. *Minerals Engineering*, 131, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>
372. Takacova, Z., Havlik, T., Kukurugya, F., & Orac, D. (2016). Cobalt and lithium recovery from active mass of spent Li-ion batteries: Theoretical and experimental approach. *Hydrometallurgy*, 163, 9–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.03.007>
373. Talens Peiró, L., Villalba Méndez, G., & Ayres, R. U. (2013). Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. *JOM*, 65(8), 986–996. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0666-4>
374. Talison Lithium. (2021). *GREENBUSHES* <https://www.talisonlithium.com/greenbushes-project>.
375. Tan, W., Huang, Y.-J., Cheng, L.-F., Fang, Y.-X., & Guan, S.-Y. (2014). Paper Deacidification with Lithium Tetraborate. *Chung-Kuo Tsao Chih/China Pulp and Paper*, 33, 40–43.
376. TcBest. (2020). *Historia de Las Baterías*. <http://www.tcbest.com.cn/Es/About-37.html>
377. Tedjar, F., & Foudraz, J. (2007). *Method for the mixed recycling of lithium-based anode batteries and cells* (Patent No. N° US 2007/0.196.725 A1).
378. Teece, D. J. (2018). Tesla and the Reshaping of the Auto Industry. *Management and Organization Review*, 14, 501–512. <https://doi.org/10.1017/mor.2018.33>
379. Tesla Motors Inc. (2020a). *MODEL 3*. <https://www.tesla.com/model3>
380. Tesla Motors Inc. (2020b). *MODEL ROASTER*. <https://www.tesla.com/roadster>
381. Tesla Motors Inc. (2020c). *MODEL S*. <https://www.tesla.com/models>
382. Tesla Motors Inc. (2020d). *MODEL X*. <https://www.tesla.com/modelx>
383. Tesla Motors Inc. (2020e). *On the road*. <https://www.tesla.com/supercharger>
384. Tesla Motors Inc. (2020f). *Solar Panels*. <https://www.tesla.com/solarpanels>
385. Tesla Motors Inc. (2020g). *Solar Roof*. <https://www.tesla.com/solarroof>
386. Tesla Motors Inc. (2020h). *TESLA*. <https://www.tesla.com/>
387. Tesla Motors Inc. (2020i). *TESLA CYBERTRUCK*. <https://www.tesla.com/cybertruck>

388. Tesla Team. (2010). *Tesla Motors Surpasses 500th 2008 Roadster Reservation*. <https://www.tesla.com/blog/tesla-motors-surpasses-500th-2008-roadster-reservation>
389. Tesla Team. (2016a). *Gaining Momentum with Tesla Powerpack*. <https://www.tesla.com/blog/gaining-momentum-tesla-powerpack>
390. Tesla Team. (2016b). *Reserving your Model 3*. <https://www.tesla.com/blog/reserving-model-3>
391. Tesla Team. (2016c). *Tesla and Panasonic Will Begin Manufacturing Solar Cells and Modules in Buffalo, NY*. <https://www.tesla.com/blog/tesla-and-panasonic-will-begin-manufacturing-solar-cells-modules-in-buffalo-ny>
392. Tesla Team. (2017a). *Solar Roof*. <https://www.tesla.com/blog/solar-roof>
393. Tesla Team. (2017b). *Tesla Powerpack to Enable Large Scale Sustainable Energy to South Australia*. <https://www.tesla.com/blog/tesla-powerpack-enable-large-scale-sustainable-energy-south-australia>
394. Tesla Team. (2019). *Introducing Megapack: Utility-Scale Energy Storage*. <https://www.tesla.com/blog/introducing-megapack-utility-scale-energy-storage>
395. Tesla Team. (2020). *Tesla's mission is to accelerate the world's transition to sustainable energy*. <https://www.tesla.com/about>
396. The Science Times. (2021). *Diamond Nuclear Battery: Will It Last Up To 28,000 Years?* <https://www.sciencetimes.com/articles/30423/20210331/diamond-nuclear-battery-will-it-last-up-to-28-000-years.htm>
397. Tomlin, B. W., & Molot, M. (1985). *Canada Among Nations 1984: A Time of Transition*.
398. Tomczak, K., Pelter, A., Gutierrez, C., Stretch, T., Hilf, D., Donadio, B., Nathan, L., Visser, E. J. De, & Tossell, C. C. (2019). Let Tesla Park Your Tesla : Driver Trust in a Semi-Automated Car. *2019 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), April*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SIEDS.2019.8735647>
399. Toro, N., Gálvez, E., Saldaña, M., & Jeldres, R. I. (2022). Submarine mineral resources: A potential solution to political conflicts and global warming. *Minerals Engineering*, 179, 107441. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107441>
400. Toro, N., Jeldres, R. I., Órdenes, J. A., Robles, P., & Navarra, A. (2020). Manganese Nodules in Chile, an Alternative for the Production of Co and Mn in the Future—A Review. *Minerals*, 10(8), 674. <https://doi.org/10.3390/min10080674>
401. Toro, N., Robles, P., & Jeldres, R. I. (2020). Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review. *Ore Geology Reviews*, 103699. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103699>
402. TOTAL. (2014). *El Rincón del Lubricante*. http://www4.total.fr/Europe/Spain/PDF/rincon_lubricante_11_14.pdf
403. TOXCO Support U.S. *Lithium Battery Recycling*. (2009).
404. Trading Economics. (2020). *Lithium 2017-2020*. <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>
405. Trading Economics. (2022). *commodities*. <https://es.tradingeconomics.com/commodities>
406. Träger, T., Friedrich, B., & Weyhe, R. (2015). Recovery Concept of Value Metals from Automotive Lithium-Ion Batteries. *Chemie Ingenieur Technik*, 87(11), 1550–1557. <https://doi.org/10.1002/cite.201500066>
407. Trefis Team. (2020). *Tesla's Most Important Metric*. <https://www.forbes.com/sites/greatspeculations/2020/06/02/teslas-most-important-metric/#12b2019a4cce>
408. Tucker, S. (2022). *Is The End of the Chip Shortage in Sight?* <https://www.kbb.com/car-news/is-the-end-of-the-chip-shortage-in-sight/>
409. Tulyaganov, D. U., Agathopoulos, S., Fernandes, H. R., & Ferreira, J. M. F. (2004). Synthesis of lithium aluminosilicate glass and glass-ceramics from spodumene material. *Ceramics International*, 30, 1023–1030. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.10.022>
410. Ultra Lithium Inc. (2018). *Lithium Uses: Glass and Ceramics*. <https://ultraresourcesinc.com/lithium-uses-glass-ceramics/>
411. UNESCO. (2019). *Erzgebirge/Krušnohoří Mining Region*. <http://whc.unesco.org/en/list/1478>
412. UNESCO. (2021). *Erzgebirge/Krušnohoří Mining Region*. <https://whc.unesco.org/en/list/1478/gallery/?index=1&maxrows=12>
413. USPTO. (2020). *Tesla Motors Patents*. <https://patents.justia.com/company/tesla>
414. Vakyabad, A. B., Ranjbar, M., Manafi, Z., & Bakhtiari, F. (2011). Tank bioleaching of copper from combined flotation concentrate and smelter dust. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65(8), 1208–1214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.09.006>
415. Valdes-Dapena, P. (2011). *Tesla Roadster reaches the end of the line*. https://money.cnn.com/2011/06/21/autos/tesla_roadster_selling_out/index.htm
416. Varela, L. M. (2018). *Nuclear fission and fusion, lithium batteries and nuclear fuel cells: current trends and prospects in the 2050 horizon*.
417. Vega-Garita, V., Hanif, A., Narayan, N., Ramirez-Elizondo, L., & Bauer, P. (2019). Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module. *Journal of Power Sources*, 438, 227011. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227011>
418. Vetter, J., Novák, P., Wagner, M. R., Veit, C., Möller, K. C., Besenhard, J. O., Winter, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C., & Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147(1–2), 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
419. Virolainen, S., Fallah Fini, M., Miettinen, V., Laitinen, A., Haapalainen, M., & Sainio, T. (2016). Removal of calcium and magnesium from lithium brine concentrate via continuous counter-current solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 162, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.hydro-met.2016.02.010>
420. Vorrath, S. (2019). *Musk re-boots plan to "make roofs come alive" as Tesla unveils new solar tile*. <https://reneweconomy.com.au/musk-re-boots-plan-to-make-roofs-come-alive-as-tesla-unveils-new-solar-tile-47624/>
421. Vynakov, O. F., Savolova, E. V., & Skrynnyk, A. I. (2016). Modern Electric Cars of Tesla Motors Company. *Automation of Technological and Business Processes*, 8(2), 9–18. <https://doi.org/10.15673/atbp.v8i2.162>
422. Wall, F., Rollat, A., & Pell, R. S. (2017). Responsible sourcing of critical metals. *Elements*, 13(5), 313–318. <https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.313>
423. Walton, N., & Spooner, E. (1976). Lithium and nuclear fusion. *Nature*, 261(5561), 533–535. <https://doi.org/10.1038/261533a0>

424. Wang, J., Chen, M., Chen, H., Luo, T., & Xu, Z. (2012). Leaching Study of Spent Li-ion Batteries. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 443–450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.061>
425. Wang, K., Wan, J., Xiang, Y., Zhu, J., Leng, Q., Wang, M., Xu, L., & Yang, Y. (2020). Recent advances and historical developments of high voltage lithium cobalt oxide materials for rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 460, 228062. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228062>
426. Wang, L., Chen, B., Ma, J., Cui, G., & Chen, L. (2018). Reviving lithium cobalt oxide-based lithium secondary batteries-toward a higher energy density. *Chemical Society Reviews*, 47(17), 6505–6602. <https://doi.org/10.1039/C8CS00322J>
427. Wang, M.-M., Zhang, C.-C., & Zhang, F.-S. (2017). Recycling of spent lithium-ion battery with polyvinyl chloride by mechanochemical process. *Waste Management*, 67, 232–239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.013>
428. Wang, R.-C., Lin, Y.-C., & Wu, S.-H. (2009). A novel recovery process of metal values from the cathode active materials of the lithium-ion secondary batteries. *Hydrometallurgy*, 99(3), 194–201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.08.005>
429. Wang, X., Gaustad, G., & Babbitt, C. W. (2016). Targeting high value metals in lithium-ion battery recycling via shredding and size-based separation. *Waste Management*, 51, 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.026>
430. Wardell Armstrong. (2015). *COMPETENT PERSON'S REPORT ON THE CINOVEC LITHIUM-TIN PROJECT, CZECH REPUBLIC*. https://www.europeanmet.com/wp-content/uploads/2017/03/CPR_2015_FinalV2_Signed_copy_2.pdf
431. Watari, T., Nansai, K., & Nakajima, K. (2020). Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. *Resources, Conservation and Recycling*, 155(July 2019), 104669. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669>
432. Weeks, M. E., & Larson, M. E. (1937). J. A. Arfwedson and his services to chemistry. *Journal of Chemical Education*, 14(9), 403. <https://doi.org/10.1021/ed014p403>
433. Wei, D., Liu, T., Zhang, Y., Cai, Z., He, J., & Xu, C. (2018). Vanadium Bioleaching Behavior by *Acidithiobacillus ferrooxidans* from a Vanadium-Bearing Shale. *Minerals*, 8, 24. <https://doi.org/10.3390/min8010024>
434. Weng, Y., Xu, S., Huang, G., & Jiang, C. (2013). Synthesis and performance of $\text{Li}[(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})(1-x)\text{Mg}x]\text{O}_2$ prepared from spent lithium ion batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 246–247, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.028>
435. Wietelmann, U., & Bauer, R. J. (2000). Lithium and Lithium Compounds. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a15_393
436. Wild, M., & Offer, G. J. (2019). *Lithium-Sulfur Batteries* (M. Wild & G. J. Offer (Eds.)). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119297895>
437. Wilkomirsky, I. (1999). *Process for removing boron from brines*.
438. World Energy Trade. (2020). *Los cinco parques eólicos marinos más grandes del Reino Unido*. <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/los-cinco-parques-eolicos-marinos-mas-grandes-del-reino-unido>
439. WIRTGEN GROUP. (2021). *Tecnología: Surface Mining*. <https://www.wirtgen-group.com/es-us/productos/wirtgen/tecnologias/mineria-de-superficie/>
440. Wu, W., Pang, X., Lin, J., Liu, X., Wang, R., Lin, J., & Chen, L. (2017). Discovery of a new subgroup of sulfur dioxygenases and characterization of sulfur dioxygenases in the sulfur metabolic network of *Acidithiobacillus caldus*. *PLOS ONE*, 12(9), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183668>
441. Xiao, Y. (2008). Chemical and Electrochemical Processing of Aluminum Dross Using Molten Salts. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 39, 348–363. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9135-9>
442. Xie, J., & Lu, Y. (2020). A retrospective on lithium-ion batteries. *Nature Communications*, 9–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-9>
443. Xin, B., Zhang, D., Zhang, X., Xia, Y., Wu, F., Chen, S., & Li, L. (2009). Bioleaching mechanism of Co and Li from spent lithium-ion battery by the mixed culture of acidophilic sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria. *Bioresource Technology*, 100(24), 6163–6169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.086>
444. Xin, Y., Guo, X., Chen, S., Wang, J., Wu, F., & Xin, B. (2016). Bioleaching of valuable metals Li, Co, Ni and Mn from spent electric vehicle Li-ion batteries for the purpose of recovery. *Journal of Cleaner Production*, 116, 249–258. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.001>
445. Xu, J., Thomas, H. R., Francis, R., Lum, K., Wang, J., & Liang, B. (2008). A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 177, 512–527. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074>
446. Xu, L., Tang, S., Cheng, Y., Wang, K., Liang, J., Liu, C., Cao, Y.-C., Wei, F., & Mai, L. (2018). Interfaces in Solid-State Lithium Batteries. *Joule*, 2(10), 1991–2015. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.009>
447. Yaksic, A., & Tilton, J. E. (2009). Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *Resources Policy*, 34(4), 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.05.002>
448. Yañez, O. (2006). *GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO EN SQM SALAR* [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102834/Gestión-del-conocimiento-en-SQM-Salar.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
449. Yang, C., Jiao, F., & Qin, W. (2017). Co-Bioleaching of Chalcopyrite and Silver-Bearing Bornite in a Mixed Moderately Thermophilic Culture. *Minerals*, 8, 4. <https://doi.org/10.3390/min8010004>
450. Yang, Y., Huang, G., Xu, S., He, Y., & Liu, X. (2016). Thermal treatment process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. *Hydrometallurgy*, 165, 390–396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.025>
451. Yang, Y., Okonkwo, E. G., Huang, G., Xu, S., Sun, W., & He, Y. (2021). On the sustainability of lithium ion battery industry – A review and perspective. *Energy Storage Materials*, 36, 186–212. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.12.019>
452. Yin, S., Wang, L., Kabwe, E., Chen, X., Yan, R., An, K., Zhang, L., & Wu, A. (2018). Copper Bioleaching in China: Review and Prospect. *Minerals*, 8(2), 32. <https://doi.org/10.3390/min8020032>
453. Ylä-Mella, J., & Pongrácz, E. (2016). Drivers and constraints of critical materials recycling: The case of indium. *Resources*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/resources5040034>

454. Yonggang, M., & Jie, Z. (1998). A rheological model for lithium lubricating grease. *Tribology International*, 31(10), 619–625. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00083-8)
455. Yoshiaki, K., Ogumi, Z., & Martin Perlado, J. M. (2019). *Lithium-Ion Batteries Overview, Simulation, and Diagnostics*. <https://doi.org/10.1201/9780429259340>
456. Young, A. H., & Sually, D. S. (2020). Lithium. In *Seminars in Clinical Psychopharmacology* (pp. 350–361). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781911623465.013>
457. Zeng, G., Deng, X., Luo, S., Luo, X., & Zou, J. (2012). A copper-catalyzed bioleaching process for enhancement of cobalt dissolution from spent lithium-ion batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 199–200, 164–169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.063>
458. Zeng, X., Li, J., & Shen, B. (2015). Novel approach to recover cobalt and lithium from spent lithium-ion battery using oxalic acid. *Journal of Hazardous Materials*, 295, 112–118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.064>
459. Zhang, P., Yokoyama, T., Itabashi, O., Suzuki, T. M., & Inoue, K. (1998). Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. *Hydrometallurgy*, 47(2), 259–271. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(97\)00050-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-386X(97)00050-9)
460. Zhang, T., He, Y., Wang, F., Ge, L., Zhu, X., & Li, H. (2014). Chemical and process mineralogical characterizations of spent lithium-ion batteries: An approach by multi-analytical techniques. *Waste Management*, 34(6), 1051–1058. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.01.002>
461. Zhang, T., & Imanishi, N. (2014). Lithium–Air Batteries. In *Nanoscale Technology for Advanced Lithium Batteries* (pp. 227–241). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8675-6_15
462. Zhang, Xiang, Hou, M., Tamirate, A. G., Zhu, H., Wang, C., & Xia, Y. (2020). Carbon coated nano-sized LiMn_{0.8}Fe_{0.2}PO₄ porous microsphere cathode material for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 448, 227438. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227438>
463. Zhang, Xihua, Cao, H., Xie, Y., Ning, P., An, H., You, H., & Nawaz, F. (2015). A closed-loop process for recycling LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ from the cathode scraps of lithium-ion batteries: Process optimization and kinetics analysis. *Separation and Purification Technology*, 150, 186–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.003>
464. Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A. I., Collis, G. E., Mahon, P. J., Rütger, T., & Hollenkamp, A. F. (2021). A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling. *Sustainable Chemistry*, 2(1), 167–205. <https://doi.org/10.3390/suschem2010011>
465. Zheng, X., Gao, W., Zhang, X., He, M., Lin, X., Cao, H., Zhang, Y., & Sun, Z. (2017). Spent lithium-ion battery recycling – Reductive ammonia leaching of metals from cathode scrap by sodium sulphite. *Waste Management*, 60, 680–688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.007>
466. Zhu, S., He, W., Li, G., Zhou, X., Zhang, X., & Huang, J. (2012). Recovery of Co and Li from spent lithium-ion batteries by combination method of acid leaching and chemical precipitation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(9), 2274–2281. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61460-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61460-X)





AGRADECIMIENTOS

Han sido muchas las personas que colaboraron desinteresadamente en la realización de este libro con sus recuerdos, su experiencia y sus historias. A todas ellas queremos agradecerles en nombre de los autores su valiosa participación y su paciencia para confirmar y chequear los datos solicitados.

Equipo Memoria Creativa

Gilbert Maldonado, gerente Producción SQM Salar
Carlos Díaz, vicepresidente Litio SQM
Gabriel Meruane, gerente de Investigación y Procesos
Eugenio Ponce, presidente del directorio de Soquimich Comercial
Germán Pérez, gerente Supply Chain VPN Litio
Alejandro Bucher, vicepresidente de Medioambiente y Comunidades SQM Salar
Pablo Altimiras, vicepresidente ejecutivo Nitratos Yodo SQM
Corrado Tore, gerente Hidrogeología Salar
Alejandro Echeverría, consultor, exdirector Product Management Litio y Yodo
Álvaro Cisternas, jefe de Operaciones en SQM
Ariel Vidal, superintendente Hidrogeología
Beatriz Oelckers, vicepresidenta de Investigación en Nitratos y Yodo
Benji Fuenzalida, encargado de fomento productivo SQM Salar
Daniel Castillo, jefe de desarrollo experimental SQM
Daniel Muñoz, superintendente de Operaciones Litio
Danilo González, director de proyectos
Darwin Recabarren, jefe de Procesos Pozas
Heber Quintanilla, jefe de planta de Hidróxido de Litio
Fabiola Rivera, encargada de evaluaciones ambientales SQM
Felipe Smith, vicepresidente comercial de Yodo Litio Asia Pacífico
Helio Hernández, gerente de Exploración
Humberto Carvajal, gerente de Producción
Javier Silva, gerente de Sostenibilidad y Relaciónamiento Comunitario Salar
José Rodríguez, jefe de Geología de Terreno
Julio Mondaca, supervisor en terreno del área Hidrogeología
Katherine Ricciardi, superintendente de Procesos Planta Litio
Gonzalo Naranjo, director técnico comercial en APAC
Laura Noguer, jefa de programa de Valor Compartido
Lorenzo Mendoza, vicepresidente de la comunidad atacameña de Camar
Manuel Tejerina, encargado técnico de la planta fotovoltaica de Camar
Marcelo Cortés, agrónomo consultor
Miguel Araya, hidrogeólogo de Operaciones
Osvaldo Yáñez, gerente de Innovación y Desarrollo
Pablo Palavecino, superintendente de Operaciones Hidróxido de Litio
Pamela Condori, líder comunitaria de la Comunidad de Santiago de Río Grande
Patricio Gajardo, director de Proyectos, Obras Civiles y Montajes Litio
Pedro Vargas, académico de Ingeniería y Química de la Universidad de Antofagasta
Peter Ehren, exconsultor de SQM Salar
Víctor Marambio, director de Proyectos Litio

Li



En 1996 SQM se convirtió en la primera compañía chilena en producir litio a partir de las salmueras del Salar de Atacama, cuando el mercado de dicho metal aún era pequeño y concentrado.

La irrupción de SQM cambió para siempre la industria mundial del litio: al ofrecer un precio accesible y disponer de una gran cantidad de metal, aceleró el desarrollo de aplicaciones que han revolucionado el planeta, como las baterías para teléfonos móviles, notebooks y autos eléctricos.

Este libro desclasifica por primera vez episodios desconocidos, dificultades, proezas y las grandes innovaciones de la producción del litio de una empresa chilena que en pocos años conquistó el liderazgo mundial de un metal esencial para la transición hacia un desarrollo económico sustentable.

La fuerza del litio aporta también necesarios y rigurosos datos sobre las propiedades físicas y químicas, tecnologías productivas, aplicaciones y mercados del litio, lo que lo convierte en un valioso material de referencia para la investigación, la academia y la industria.



Soluciones
para el
desarrollo
humano



UNIVERSIDAD ARTURO PRAT
DEL ESTADO DE CHILE

CONOCIMIENTO Y TERRITORIO