

Perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y América del Sur

Mario Castillo
Ingrid Garcés
Rodrigo Furtado Messias



NACIONES UNIDAS

CEPAL



75 años

Trabajando por un futuro productivo, inclusivo y sostenible



cooperación alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

[Deseo registrarme](#)



NACIONES UNIDAS



www.cepal.org/es/publications



www.instagram.com/publicacionesdelacepal



www.facebook.com/publicacionesdelacepal



www.issuu.com/publicacionescepal/stacks



www.cepal.org/es/publicaciones/apps

SERIE

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

223

Perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y América del Sur

Mario Castillo

Ingrid Garcés

Rodrigo Furtado Messias



NACIONES UNIDAS

CEPAL



**cooperación
alemana**

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Este documento fue preparado por Mario Castillo, ex Director de la División de Comercio Internacional e Integración de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Ingrid Garcés, consultora de la División de Recursos Naturales de la CEPAL, y Rodrigo Furtado Messias, funcionario de dicha División, como parte de las actividades de asistencia técnica a la Subsecretaría de Relaciones Económicas Internacionales del Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile, en el marco del programa Cooperación Regional para la Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos (MinSus), ejecutado por la CEPAL y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Los autores agradecen los comentarios de la Subsecretaría de Relaciones Económicas Internacionales. Asimismo, agradecen las contribuciones de Pablo Chauvet, Mauricio León, José Luis Lewinsohn y Orlando Reyes, funcionarios de la CEPAL.

También agradecen los aportes de los asistentes al taller del Foro Permanente de Diálogo Técnico sobre Innovación, Desarrollo Tecnológico y Agregación de Valor al Litio de los Países del Triángulo y México, realizado en La Palca (Estado Plurinacional de Bolivia), los días 8 y 9 de mayo de 2024.

Las Naciones Unidas y los países que representan no son responsables por el contenido de vínculos a sitios web externos incluidos en esta publicación.

No deberá entenderse que existe adhesión de las Naciones Unidas o los países que representan a empresas, productos o servicios comerciales mencionados en esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
ISSN: 2664-4541 (versión electrónica)
ISSN: 2664-4525 (versión impresa)
LC/TS.2024/38
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2024
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.2400570[S]

Esta publicación debe citarse como: M. Castillo, I. Garcés y R. Furtado Messias, "Perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y América del Sur", *serie Recursos Naturales y Desarrollo*, N° 223 (LC/TS.2024/38), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	7
Introducción	9
I. Situación regional e internacional de la electromovilidad y la industria del litio	13
A. Un nuevo escenario para el desarrollo de la cadena de valor del litio	13
B. Tendencias disruptivas en la electromovilidad y sus implicaciones en las políticas industriales	15
C. Carrera para desarrollar cadenas de suministro nacionales.....	19
D. Oportunidades de colaboración en un mercado en expansión	20
II. El litio factor clave para la electromovilidad y otras industrias	25
A. Reservas y producción de litio	25
B. Usos y aplicaciones del litio	27
C. El mercado, la demanda y la oferta.....	28
D. Huella de carbono, hídrica y energética de la producción de compuestos de litio	32
III. Las cadenas de valor relacionadas con el litio y espacios para Chile y América del Sur	35
A. Los desafíos tecnológicos y ambientales de las cadenas de valor relacionadas con el litio	35
B. Las posibilidades en la cadena de valor aguas arriba: exploración, extracción y producción de litio refinado	37
C. Las posibilidades en la cadena de valor aguas abajo: fabricación de baterías de iones de litio	39
IV. Propuestas de políticas de desarrollo de capacidades y cooperación regional	43
A. Enfoque de políticas y áreas de cooperación para el desarrollo de la industria del litio en Chile y América del Sur.....	43
B. Propuesta para una agenda regional de cooperación en el triángulo del litio	46

V. Conclusiones	51
Bibliografía	53
Anexo A1	57
Serie Recursos Naturales y Desarrollo: números publicados.....	59
Cuadros	
Cuadro 1 Cambios esperados en la participación de los mercados en la cadena de valor del litio mundial en el período 2022-2030	16
Cuadro 2 Políticas industriales verdes recientes en Estados Unidos, Unión Europea, Australia y Japón	17
Cuadro 3 Marcos normativos para la explotación del litio e instrumentos y mecanismos para la creación de capacidades para la agregación de valor a ese recurso en los países del triángulo del litio	20
Cuadro 4 Producción y reservas mundiales de litio	25
Cuadro 5 Aplicaciones del litio en el ámbito de la química fina.....	28
Cuadro 6 Comparación intensidad de CO ₂ en la producción de hidróxido de litio.....	33
Cuadro 7 Comparación del consumo de energía y agua por compuesto de litio en salmueras y espodumeno	33
Cuadro 8 Situación productiva de los países del triángulo del litio	36
Cuadro 9 Enfoque de políticas para el desarrollo sostenible de los salares y áreas de cooperación regional	44
Cuadro 10 Enfoque de políticas para cadena de valor de la fabricación de baterías de iones de litio y áreas de cooperación regional	45
Cuadro 11 Instrumentos de financiamiento en ciencia, tecnología e innovación.....	45
Gráficos	
Gráfico 1 Usos del litio	27
Gráfico 2 Precio internacional del litio 2018-2024	29
Gráfico 3 Crecimiento de la demanda de litio 2022-2050	30
Gráfico 4 Proyección de la demanda total de litio por uso.....	30
Gráfico 5 Proyección de oferta de litio por compuestos y la demanda agregada de litio para vehículos eléctricos 2020-2035	31
Gráfico 6 Participación en la producción mundial por empresas productoras de carbonato de litio durante el 2022.....	32
Gráfico 7 Estimación de la participación de China en el mercado en la producción de cátodos frente al resto del mundo, 2025	41
Recuadros	
Recuadro 1 La ruta de Tesla hacia la producción de los vehículos eléctricos	18
Recuadro 2 El rol de la empresa YPF en el litio	21
Recuadro 3 Los principales compuestos de litio producidos en Chile.....	28
Recuadro 4 El rol de las empresas públicas y los Centros Tecnológicos Nacionales	46

Diagramas

Diagrama 1	Cadena de valor aguas arriba baterías de iones de litio	37
Diagrama 2	Cadena de valor aguas abajo de baterías de iones de litio	40
Diagrama 3	Ecosistema industrial de la electromovilidad regional.....	48

Mapa

Mapa 1	Mundo: principales países con recursos identificados de litio, 2023	26
--------	---	----

Resumen

Este estudio examina las perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor en torno al litio en Chile, destacando la complementariedad con Argentina, Brasil y Bolivia, además de proponer directrices de políticas públicas para fomentar las capacidades regionales en medio al aumento de la demanda de minerales necesarios para la fabricación de tecnologías para la transición energética y la electromovilidad. En el año 2022, se observó un notable incremento en la inversión mundial en la transición energética, abarcando proyectos de energías renovables, electromovilidad y almacenamiento de carbono, lo que generó una demanda global de litio de 690 mil toneladas de Carbonato de Litio Equivalente (LCE). Chile y América del Sur tienen la oportunidad de superar la dicotomía entre una industria basada en recursos no renovables y una sostenible de base tecnológica.

Las propuestas de políticas se realizan tomando en consideración el nuevo ciclo tecnológico y las estrategias corporativas asociadas a la transición de la industria automotriz, el desarrollo de energías renovables, la producción de baterías y sus componentes y la extracción de litio de manera más sustentable. Para subsanar la heterogeneidad institucional de los países del triángulo del litio, se plantea una plataforma de colaboración regional organizada sobre tres ejes principales: colaboración tecnológica, colaboración productiva y colaboración financiera.

Se proponen tres objetivos estratégicos de cooperación regional: configurar un ecosistema de explotación sustentable de salares; desarrollar capacidades tecnológicas para el diseño y fabricación de baterías de iones de litio para almacenamiento de energía y; promover un mercado regional de electromovilidad para el transporte público. El análisis se enfoca, en primer lugar, en el clúster de exploración, extracción y producción de litio refinado y, en segundo lugar, en el clúster de fabricación de baterías de iones de litio tanto para vehículos eléctricos como para almacenamiento estacionario. Un elemento clave es la visión de desarrollo sostenible que abarca aspectos sociales, ambientales y tecnológicos.

Introducción

A. Industrialización sostenible del litio para la transición energética

La inversión global en la transición hacia la energía baja en carbono alcanzó un récord en el año 2022, mostrando una gran aceleración con respecto a los años anteriores, como consecuencia de la crisis energética y a las acciones políticas que impulsaron una mayor implementación de tecnologías de energía limpia. En 2022, la inversión global en la transición energética ascendió a la cifra inédita de 1.1 billones de dólares, un aumento del 31% con respecto al año anterior. Este monto incluye la inversión en proyectos como energías renovables, almacenamiento, infraestructura de carga, producción de hidrógeno, nuclear, reciclaje, y captura y almacenamiento de carbono, además de las compras de tecnología de energía baja en carbono por parte de los usuarios finales, como sistemas solares de pequeña escala, bombas de calor y vehículos de cero emisiones (BloombergNEF, 2023). De la demanda mundial de litio del año 2022, que alcanzó a las 690 mil toneladas de Carbonato de Litio Equivalente (LCE), el 65% es explicado por la fabricación de baterías de iones de litio de vehículos eléctricos del sector automotriz y el 11% por otras baterías y almacenamiento energético (COCHILCO, 2023).

Si bien la energía renovable siguió siendo el sector más grande con 495 mil millones de dólares, un aumento del 17% interanual, el transporte eléctrico está creciendo mucho más rápido y alcanzó los 466 mil millones con un aumento del 54%. China es, con holgura, el mayor contribuyente, representando casi la mitad de la inversión global en transición energética, mientras que Estados Unidos está en segundo lugar, pero a cierta distancia. De acuerdo con las proyecciones, la inversión necesaria en la transición debe promediar más de tres veces este nivel durante el resto de esta década para cumplir con un escenario de cero emisiones (BloombergNEF, 2023).

Como consecuencia del dinamismo observado en la generación de energía de fuentes renovables, eólica y solar, la expansión de la red eléctrica y el aumento de la flota de vehículos eléctricos se espera para el año 2030 un fuerte aumento de la demanda de metales y minerales críticos, así como brechas de suministros en la producción, destacando entre ellos el cobre, litio, níquel y grafito (The Economist, 2023). Con este nuevo auge de las materias primas asociado a la transición verde, se

trae nuevamente a colación la reflexión que ha realizado la CEPAL en torno al modelo de crecimiento a base de recursos naturales. En la actualidad la región ya provee más de un tercio del cobre mundial, la mitad de la plata, componente de paneles solares, y más de cuarenta por ciento de la producción de litio (CEPAL, 2022a).

A pesar del importante desarrollo de la industria de recursos naturales en la región, las economías se caracterizan por exhibir un bajo nivel de sofisticación, productividad y crecimiento del PIB per cápita. En el inicio de este nuevo ciclo económico, caracterizado por una transición hacia un crecimiento sostenible desde el punto de vista ambiental, se abre una nueva oportunidad, no solo a través del crecimiento de los mercados de estos recursos, sino también para participar en las cadenas de valor y la innovación tecnológica asociadas a la transición energética (Mazzucato, 2022).

Las políticas climáticas han sido los principales impulsores directos de la electromovilidad y de ahí la necesidad de almacenamiento de energía. La electrificación mediante baterías de iones litio es considerada, hasta ahora, la ruta más eficiente para avanzar en la descarbonización del transporte y esto está generando una creciente demanda de almacenamiento de energía a mediano y largo plazo. Sin embargo, el rápido crecimiento que ha experimentado la industria internacional de electromovilidad está enfrentando tres obstáculos o desajustes mayores. En primer lugar, dificultades para obtener suficientes materias primas, incluyendo litio, níquel y cobalto, utilizados en las baterías. En segundo lugar, una insuficiente capacidad de mega-fábricas (gigafactorías) que produzcan eficientemente las baterías necesarias. Y, en tercer lugar, severas limitaciones de cobertura de la infraestructura de carga pública basadas en energías renovables (Hensley y otros, 2022).

Las políticas climáticas han sido abundantes en los países desarrollados, destacando el paquete "Fit for 55" de la Unión Europea y la Ley de Reducción de la Inflación en los Estados Unidos. Para el año 2030 se espera que la participación promedio de los automóviles eléctricos en las ventas totales en China, la UE y Estados Unidos aumentará a alrededor del 60%. Sin embargo, la manufactura seguirá concentrada, con China dominando el comercio de baterías y componentes, y manteniendo su alta participación en las exportaciones mundiales de automóviles eléctricos.

Como consecuencia de la alta demanda y el aumento de los precios del litio, se ha impulsado fuertemente las actividades de exploración y descubrimientos de nuevos recursos a nivel internacional. Aunque los recursos de litio estén aumentando permanentemente, los países del denominado triángulo del litio—donde el metal se encuentra en salares—son los que aportan la mayor proporción de recursos mundiales y a costos más competitivos. El triángulo del litio, conformado por Chile, Argentina y Bolivia (Estado Plurinacional de), cuenta con un 53% de los recursos identificados de litio hasta ahora conocidos (USGS, 2024).

Cabe señalar que, en la última década, los países del triángulo del litio han intentado diversas políticas públicas orientadas para lograr distintos objetivos como aumentar la renta generada a partir de la explotación del recurso, mejorar las condiciones de captura de dicha renta y, desarrollar eslabonamientos productivos a partir de la extracción y refinación del litio. En el caso de las políticas dirigidas a generar valor a este mineral, han existido una gran variedad de iniciativas condicionadas en cada país por su modelo de gobernanza, marco normativo e instrumentos de política vigente. Entre estas medidas destaca la propuesta de la Comisión Nacional del Litio de Chile, del año 2014, que tuvo por objetivo dinamizar la exploración y explotación, impulsar la agregación de valor y potenciar la cadena productiva asociada a la investigación y desarrollo (León y otros, 2020). A pesar de la importancia de esta y otras iniciativas se ha concluido que no lograron rendir los frutos que se esperaban (Jiménez y Sáez, 2022). En particular las estrategias de agregación de valor de Chile, a través de una cuota de abastecimiento a precio preferente, o de Bolivia (Estado Plurinacional de), a través del control directo del recurso, no se habían traducido hasta fines del 2022 en proyectos significativos de valor agregado de litio.

Hay señales que indican que estamos ante un nuevo escenario de aceleración de la transición energética, caracterizado por una reorganización de la industria de la electromovilidad, ambiciosos programas de subsidios, cambios tecnológicos y competencia geopolítica entre los principales bloques. En este proceso de reestructuración de la industria mundial, se abre una oportunidad para que América del Sur, sobre la base de una estrategia de no alineamiento activo, pueda insertarse de manera más activa en las cadenas de valor en torno al litio. Como expresión de esta nueva fase, destacan los recientes anuncios de inversiones de empresas chinas en Chile (BYD y Yongqing Technology) que instalarán dos plantas de producción de material catódico que superan los 520 millones de dólares¹ de inversiones estimadas. Por otra parte, desde la Unión Europea, en el marco de la reciente Cumbre UE-CELAC, se señaló la importancia geopolítica del litio y las energías renovables a través de diversas iniciativas de inversión (*Global Gateway Investment Agenda*) para la promoción de energías renovables, electromovilidad y la lucha contra el cambio climático, reforzando el trabajo en torno a las cadenas de valor de las industrias basadas en minerales². Finalmente, el interés y apertura de Estados Unidos se ha expresado en un acuerdo para establecer un grupo de trabajo con Chile, con el objetivo de precisar los alcances de los subsidios asociados a la Ley de Reducción de la Inflación (IRA) para las inversiones que se realicen en su territorio.

En este trabajo se sostiene que Chile y América del Sur, en el contexto de la transición energética, pueden abatir la clásica dicotomía entre el desarrollo de una industria basada en recursos naturales no renovables o desarrollar una industria sostenible de base tecnológica. Para romper con esta falsa dicotomía, se proponen algunos lineamientos para avanzar y converger en un doble enfoque de desarrollo, en un contexto de cooperación regional.

El propósito del presente estudio es evaluar, a partir de las recientes condiciones internacionales y regionales, las posibilidades de desarrollo de las cadenas de valor en torno al litio en Chile en particular, y en América del Sur en general, con énfasis en la complementariedad con Argentina, Bolivia y Brasil. Las propuestas de cooperación regional se organizan en tres objetivos estratégicos: en primer lugar, el desarrollo de un ecosistema de explotación sustentable de salares; en segundo lugar, la promoción de corredores verdes para la cadena internacional de baterías de iones de litio para vehículos eléctricos y; en tercer lugar, el desarrollo de un mercado regional de baterías de almacenamiento energético para el sector de energías renovables.

Para efectos de este trabajo, se distinguen tres clústeres principales en torno a la industria del litio: primero, la cadena de valor de la exploración, extracción y producción de litio refinado; segundo, la cadena de valor de la fabricación de baterías de iones de litio y; tercero, la cadena de valor en torno a los vehículos eléctricos. El análisis y las propuestas se concentran principalmente en los dos primeros, sin descartar que existen posibilidades de cooperación en el clúster de vehículos eléctricos, asociado a la integración y producción de autobuses eléctricos en América del Sur.

Un aspecto clave de las propuestas es la visión de desarrollo sostenible en torno al litio, considerando la dimensión social, medioambiental y tecnológica. Es sabido que la extracción de litio más rentable a nivel internacional se realiza en los salares de la Puna, una ecorregión que comparten Argentina, Bolivia y Chile en la cordillera media de los Andes, a más de 3.200 metros sobre el nivel del mar. Sin embargo, cada uno de los salares es un ecosistema único, frágil y constituido por cuencas

¹ Los antecedentes del proceso de selección de productores especializados para la elaboración de productos de valor agregado de litio en Chile se encuentran en: https://www.corfo.cl/sites/cpp/landing_litio.

² Los días 17 y 18 de julio de 2023 tuvo lugar la III Cumbre Unión Europea (UE) - Comunidad de Estados Latinoamericanos y del Caribe (CELAC) de Jefes de Estado y de Gobierno en Bruselas. Los principales resultados se encuentran en: <https://www.europarl.europa.eu/eurolat/es/eu-latin-america/celac-eu-summits>.

cerradas con poco acceso al agua a lo largo del año. Además, los humedales albergan una valiosa biodiversidad y dependen de delicados equilibrios entre los sistemas de agua dulce y de agua salobre (Heinrich-Böll-Stiftung, 2020).

En la actualidad, los mayores beneficios de las cadenas de valor favorecen a pocas empresas y países industriales, mientras que los países extractivos de minerales asumen los costos ambientales afectando a las comunidades anfitrionas y su ecosistema. Es por ello que se presta atención a los recursos hídricos locales (Agusdinata y otros, 2018), la conservación de la vegetación (Liu y otros, 2019), las tradiciones culturales y los estilos de vida indígenas (Babidge, 2020). Es necesario que la industrialización y de transferencia tecnológica se acompañe con una mejor convivencia de la minería extractiva con las economías regionales y el respeto a las prácticas sociales y culturales de las comunidades cercanas o vinculadas con los salares.

La ambición es lograr una expansión de la producción de manera sostenible y, simultáneamente, desarrollar ciencia, tecnología e innovación y comunidad en relación con dicha industria. Países emblemáticos como Noruega, Suecia y Nueva Zelanda, han incorporado prácticas ambientales sostenibles en el desarrollo de sus industrias de recursos naturales y también han desarrollado capacidades tecnológicas y una mayor sofisticación en sus estructuras productivas.

Este texto está organizado en cinco capítulos principales, además de la introducción. En el segundo capítulo se menciona el nuevo escenario internacional; en el tercero, se aborda el litio como factor clave de la electromovilidad; en el cuarto, se analiza las cadenas de valor relacionados con el litio y las posibilidades regionales y; en el quinto, se realizan propuestas de arreglos institucionales y políticas.

I. Situación regional e internacional de la electromovilidad y la industria del litio

A. Un nuevo escenario para el desarrollo de la cadena de valor del litio

Se ha desatado una carrera y competencia en que participan desde países industrializados, pasando por grandes empresas líderes, hasta países en desarrollo. Por una parte, países como China, Estados Unidos, junto a bloques económicos como la Unión Europea, están implementando un conjunto de políticas industriales con ingentes recursos con foco en la electromovilidad, con diversas iniciativas para promover inversiones, desarrollo tecnológico, asegurar fuentes de minerales críticos y diversificar las cadenas de suministro. Por otra parte, las grandes empresas automotrices y los fabricantes de baterías están compitiendo por establecer y asegurar contratos a largo plazo con empresas mineras y refinadoras.

Desde los países en desarrollo con reservas, como es el caso del triángulo del litio, desean utilizar los recursos como un medio para fomentar una estrategia industrial en torno a dos clústeres principales: la cadena de valor de la exploración, extracción y producción de litio refinado; y la cadena de valor de la fabricación de baterías de iones de litio. Por otra parte, países de la región con larga tradición en la industria automotriz —como es el caso de Brasil y México— promueven el desarrollo de la cadena de valor en torno a los vehículos eléctricos.

La industria de la electromovilidad y de energías renovables está en transición y enfrenta altos niveles de incertidumbre. En los próximos años probablemente se altere la organización industrial con una mayor participación de Estados Unidos, Europa y Oceanía, en desmedro de la actual hegemonía de China. Hay una nueva revolución tecnológica en curso donde convergen la manufacturera avanzada digital con la transición energética para la reducción de emisiones. Sectores industriales que hace algunos años se consideraban maduros, como la industria automotriz y las energías renovables, hoy son considerados sectores de alta tecnología y de prioridad geopolítica. Por otra parte, surge la necesidad de extraer y producir litio de manera más limpia y sustentable. Todos estos elementos son piezas de un puzle energético que está en construcción.

Los países del triángulo del litio deben actuar y alinearse dentro de un escenario en construcción, muy dinámico, con tensiones geopolíticas y donde coexistirán estrategias de competencia con las de cooperación. Avanzar en el desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y en América del Sur es un objetivo compartido, pero debe elaborarse en un escenario internacional de una incierta “rivalidad cooperativa” y, por lo tanto, no será una tarea fácil ni trivial.

Es conocido que la situación regulatoria, normativa, productiva y tecnológica es heterogénea entre los países y cada uno tiene una propia singularidad, destacando los recursos identificados de Bolivia (Estado Plurinacional de), los volúmenes de producción de Chile y el desarrollo tecnológico de Argentina. En la actualidad, tanto en Argentina como en Chile, los incentivos se centran en maximizar la producción para aprovechar el ciclo de crecimiento de la demanda de litio. Se espera que entre 2022-2030, la demanda mundial de litio aumente al menos un 17% anual en promedio, lo que implica que la demanda global de litio se triplicará este periodo (COCHILCO, 2023). En un escenario que buscaría alcanzar cero emisiones netas de carbono, la demanda de litio podría multiplicarse en más de diez veces en 2050 por sobre los niveles de 2022 (IEA, 2023a).

Uno de los factores de incertidumbre se refiere a la prontitud con que los países van a reaccionar al fuerte aumento de la demanda mundial. Algunos estudios indican que, en diez años, la capacidad de producción de la región podría aumentar en unas 2,7 veces según los proyectos en carpeta, clasificados como probables y cerca de 5 veces, si se consideran los clasificados como posibles y especulativos (CEPAL, 2022a; Jones y otros, 2021).

Más allá del triángulo del litio, existe una carrera por descubrir nuevas reservas y asegurar el abastecimiento. Desde países bien establecidos en la producción de litio, como Australia, Chile, China y Argentina, hasta países con recursos y reservas recientemente mapeados, como México, Canadá, Bolivia, Estados Unidos y Ucrania, pasando por ubicaciones típicamente no asociadas con el litio, como Siberia, Tailandia, Reino Unido y Perú. Lo más probable es que se hagan anuncios regularmente sobre nuevas capacidades ya que diversos proyectos en etapas tempranas sean factibles, incluyendo salmueras convencionales y activos de roca dura. La puesta en operación de nuevos proyectos también estará influenciada por la dinámica de precios del litio. La disparada de los precios entre 2022 y principios de 2023 pudo haber incentivado el desarrollo de proyectos menos convencionales y con tecnologías incipientes. Será importante observar cómo los inversores reaccionan ante la posterior disminución y estabilización de los precios desde mediados de 2023 (más información en el siguiente capítulo).

La oferta de minerales críticos es uno de los factores clave para facilitar la transición energética, pero dependerá del acuerdo y alineamiento estratégico de los actores en las cadenas de valor, entre empresas mineras, refinerías, fabricantes de baterías y fabricantes de vehículos automotrices. Y es a partir de este alineamiento —de rivalidad cooperativa— donde se abrirán las oportunidades para avanzar en las cadenas de valor, hacerlo de otra forma no serán más que propuestas voluntaristas que terminarán en la irrelevancia.

Es poco probable esperar una expansión equilibrada de las cadenas de valor del litio que, por una parte, aseguren altos estándares ambientales y, por otro, distribuyan de manera espontánea los beneficios a los países en desarrollo y las comunidades locales. Las recientes medidas anunciadas por Estados Unidos y China hacen prever un escenario complejo. A las restricciones a la inversión estadounidense en tecnologías sensibles, que se suman a los aranceles, revisiones de inversiones y controles de exportaciones dirigidos a China, este último país ha respondido con las leyes de control de exportaciones, en contra de sanciones, espionaje, ciber seguridad y protección de datos, afectando a importantes empresas norteamericanas (The Economist, 2023a).

La región tendrá que lidiar con esta permanente tensión y competencia estratégica entre Estados Unidos, Unión Europea y China, y apostar a una inserción productiva y tecnológica en que pueda maximizar las posibilidades de desarrollo en los clústeres de valor agregado antes mencionados. En los capítulos siguientes, se analizará en profundidad las condiciones que hacen factible una estrategia de agregación de valor.

En el primer clúster, de exploración, extracción y producción de litio refinado (cadena de valor aguas arriba), se abordarán los siguientes objetivos: diferenciación de productos en la producción de refinados (*de-commodification* a través de la producción de carbonato de litio grado batería); sostenibilidad ambiental a través del desarrollo de la geohidrología de salares (gestión y uso del agua) y tecnologías de extracción directa para reducir huella ambiental; desarrollo de proveedores de bienes y servicios de ingeniería.

En el segundo clúster, asociado a la cadena de valor de la fabricación de baterías de iones de litio (cadena de valor aguas abajo), se analizarán la viabilidad de las siguientes actividades: fabricación de los componentes de las celdas (ánodo, cátodo, electrolito y separadores), fabricación de celdas y producción de baterías para fines específicos.

En el capítulo V, se abordarán las propuestas de política para promover, de manera combinada, el desarrollo de ambos clústeres. Se hará una distinción entre dos modelos principales: las políticas públicas para sectores basados en recursos naturales como lo son los salares y; las políticas públicas para sectores de base tecnológica asociada a la cadena de valor de baterías de iones de litio. Para cada modelo se abordarán los principios de las políticas, los instrumentos en el fomento empresarial, ciencia, tecnología e innovación, financiamiento de inversiones y fortalecimiento institucional.

B. Tendencias disruptivas en la electromovilidad y sus implicaciones en las políticas industriales

La transición verde y la descarbonización que está ocurriendo a nivel internacional han situado en un lugar privilegiado al abastecimiento del litio y otros minerales críticos para la electromovilidad en la agenda del nuevo orden tecnológico internacional. Este se caracteriza por la prevalencia de factores geopolíticos por sobre los de rentabilidad económica, una nueva generación de políticas industriales para la descarbonización y una profunda transformación de la industria automotriz.

Existe una carrera para asegurar fuentes de litio y diversificar las cadenas de suministro, lo que alterará en los próximos años la organización industrial del sector. Los fabricantes de baterías y automóviles están compitiendo por establecer contratos a largo plazo con empresas mineras y refinadoras. Los países con grandes industrias automotrices están desarrollando sus propias cadenas de suministro regionales de baterías de iones de litio. Y las naciones con reservas de litio, donde se incluye los países del triángulo, desean utilizarlo como un medio para desarrollar las cadenas de valor en torno a la electromovilidad (Wurzbacher y otros, 2022).

El mercado mundial de la electromovilidad se reorganiza en tres principales bloques de países, cada uno con grandes industrias automotrices (Asia, Europa y Norteamérica). Cada bloque está rivalizando y compitiendo por desarrollar sus propias capacidades tecnológicas, cadenas de suministro de baterías de iones de litio y redes de abastecimiento de materiales críticos. Tal como se muestra en el cuadro 1, para el periodo 2022-2030, se espera una significativa reorganización de la industria con tres tendencias principales: desaparición del oligopolio de extracción, procesamiento y refinamiento del litio con nuevos entrantes; el dominio de China en la cadena de producción de baterías se mantendrá, aunque con mayor competencia de Estados Unidos y Europa, y; en la producción de vehículos eléctricos China disminuirá su cuota de mercado como resultado de una mayor participación de Europa y Estados Unidos.

Cuadro 1
Cambios esperados en la participación de los mercados en la cadena de valor
del litio mundial en el período 2022-2030

Cadena de valor	Países dominantes 2022	Países dominantes 2030	Margen de ganancias en la cadena
Extracción mineral	Australia, Chile y China	Australia, China, Chile, Argentina, Brasil, Europa y Estados Unidos	25%-30% (incluye procesamiento)
Procesamiento y refinamiento	China y Chile	China, Chile, Argentina, Estados Unidos, Australia y Europa	
Manufactura de celdas y baterías	China, Japón y República de Corea	China, Japón, República de Corea, Europa y Estados Unidos	20%-25%
Vehículos eléctricos	China, Europa y Estados Unidos	China, Europa, Estados Unidos, Japón y República de Corea	45%-50%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de antecedentes del Boston Consulting Group e iLi Markets.

Cabe destacar que China se mantendrá como el mayor procesador de metales, productor de celdas y fabricante de baterías terminadas. Incluso cuando esta producción se realiza en terceros países, las empresas chinas dominan los procesos y las tecnologías. Esta situación ha hecho que, para Estados Unidos y Europa, la cadena de valor de las baterías y los vehículos eléctricos se tomen la agenda sobre política industrial. Los países están compitiendo por desarrollar capacidades y promover inversiones en toda la cadena, mientras tanto, los reguladores y operadores de redes eléctricas están buscando formas de asegurar que los vehículos eléctricos beneficien al sistema energético.

Entre las políticas industriales verdes destaca la Ley de Reducción de la Inflación (IRA por sus siglas en inglés), que destina 391 mil millones de dólares para tomar acciones más agresivas para enfrentar la crisis climática y fortalecer la seguridad económica y energética. La IRA, aprobada en el Congreso de Estados Unidos en 2022, fue la mayor dotación legislativa para la financiación climática y marcó un punto de inflexión en la financiación de la transición ecológica. Esta ley asigna créditos fiscales y subvenciones para una amplia variedad de actividades destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El mayor segmento (161.000 millones de dólares, o el 41%) se destina a subvenciones para la electricidad limpia, con subvenciones adicionales para la descarbonización de los sectores de la fabricación, el transporte, la construcción, la agricultura y el uso del suelo (The White House, 2023).

Muchos de los subsidios en la IRA tienen requisitos para la fabricación o adquisición de componentes provenientes de Estados Unidos o Norteamérica (incluyendo a Canadá y México). Estas disposiciones han suscitado tanto críticas como imitaciones por parte de los aliados occidentales de Estados Unidos. A este respecto, la Unión Europea, Japón, Australia y otros aliados occidentales, como el caso de Chile, han expresado su preocupación de que estas iniciativas desplacen a las industrias de energías limpias de rápido crecimiento e innovadoras hacia el mercado norteamericano (EIU, 2023).

En respuesta, varios países han desarrollado legislaciones similares a la de IRA. La Unión Europea ha flexibilizado sus propias reglas de ayuda estatal mediante el Plan Industrial Green Deal, propuestas que incluyen el Acta de Industria Net-Zero (NZIA, Ley de Industria Net-Zero y el Marco Temporal de Crisis y Transición), que permite a los estados miembros utilizar ayudas estatales para igualar las extranjeras si pueden demostrar creíblemente que las empresas podrían trasladarse a otro lugar. Francia ya ha aprovechado estas flexibilizaciones para subsidiar del 25% al 40% de la inversión en capital verde, un paquete de subsidios estimado en crear 20 mil millones de euros en inversión. Estos subsidios están condicionados a adquirir diversos componentes de la UE. Con el Pacto Verde se espera mejorar significativamente en la refinación, procesamiento y reciclaje de materias primas críticas en Europa³.

³ Se anunció en el Plan Industrial del Pacto Verde que, junto con la reforma del mercado eléctrico y la Ley de Industria Net Zero, las medidas sobre materias primas críticas crean un entorno regulatorio adecuado para las industrias net-zero y la competitividad de la industria europea.

Por otra parte, Japón y Australia también han desarrollado sus propios esquemas de subsidios. El gobierno de Japón se ha propuesto estimular hasta 150 billones de yenes (1.1 billones de dólares) en inversiones verdes a través de asociaciones público-privadas financiadas con bonos gubernamentales como parte de su Ley de Transformación Verde, que se enfoca en sectores críticos de energía limpia, incluyendo el hidrógeno verde y el amoníaco (producidos con energía renovable). El Fondo Nacional de Reconstrucción de Australia se presenta principalmente como un programa de infraestructura, centrado en varias áreas prioritarias, muchas de las cuales no están relacionadas con la descarbonización. Los gobiernos consideran que el elemento de creación de empleo doméstico es también fundamental para lograr el apoyo del público además del cambio climático. En el cuadro 2 se presentan algunas de las principales iniciativas de políticas industriales verdes que se han anunciado en los últimos años.

Cuadro 2
Políticas industriales verdes recientes en Estados Unidos, Unión Europea, Australia y Japón

	Ley de Reducción de la Inflación (IRA)	Plan Industrial del Pacto Verde Unión Europea	Fondo Nacional de Reconstrucción de Australia	Ley de Transformación Verde de Japón
Vigencia	Aprobado en agosto 2022.	Propuesto en marzo de 2023.	Aprobado en marzo 2022.	Propuesto en febrero 2023.
Subsidios	Se estima en US\$391 mil millones para la transición verde en el sector eléctrico, transporte, industria, construcción y otros.	El "nuevo marco de crisis y transiciones temporales" prevé un nivel ilimitado de subsidio. En Francia se estima en €20 mil millones.	Alrededor de US\$10 mil millones en siete áreas prioritarias. Cerca de US\$2 mil millones para renovables e infraestructura cero emisiones.	Alrededor de US\$354 millones de subsidios en diez años para desbloquear US\$354 mil millones en inversiones focalizadas en hidrógeno verde y producción de amoníaco.
Disposiciones de localización de inversiones y abastecimiento	Materiales para baterías y VE deben ser producidos o reciclados en EE. UU. o en países con acuerdos de libre comercio; el objetivo es producir al menos el 40% de las tecnologías verdes al 2023.	Los subsidios requieren demostrar que de otra forma la empresa se podría trasladar al exterior; el objetivo es producir al menos el 40% de las tecnologías verdes al 2023.	Disposiciones para garantizar inversiones única o principalmente basadas en Australia.	No incluye.
Disposiciones para materiales críticos	Acuerdo con Japón y UK para no imponer restricciones indebidas a la exportación de materias primas críticas con esos países.	La Ley de Materias Primas Críticas establece requisitos mínimos para el abastecimiento nacional y la diversidad de suministro de minerales críticos.	La Estrategia de Minerales Críticos proporciona financiamiento para promover el procesamiento nacional.	Permite subsidios para proveedores internacionales de minerales críticos.

Fuente: Elaboración propia basada en EIU (2023).

Existen otros casos como los de la República de Corea y China que tienen importantes políticas industriales verdes de larga data. En el caso de la República de Corea, desde el año 2010, se han implementado diversos programas para el desarrollo de la movilidad eléctrica a través del fomento y regulaciones públicas, tales como incentivos fiscales a la compra de vehículos eléctricos, estándares, regulaciones y mandatos de reducción de emisiones y programas de desarrollo tecnológico e infraestructura de carga. Esta política se distinguió con tres fases principales: durante 2010-2012, se construyó una base de suministro de electromovilidad enfocada al sector público; entre 2013-2015, se estimuló el mercado privado y la producción industrial para la electromovilidad y, desde 2016, se promovió un escalamiento del mercado mediante la diversificación de la producción y la expansión y sofisticación de la infraestructura de carga. También, desde el año 2015, se ha estado estimulando el desarrollo de los vehículos de hidrógeno mediante el apoyo de subsidios y la expansión de estaciones de carga, principalmente en automóviles de pasajeros (Kyuok, 2022).

En el caso de China, a partir del año 2010, la industria verde —es decir la de vehículos eléctricos, conservación de energía y protección ambiental— fue declarada industria estratégica emergente y de alta prioridad política. Durante más de una década diversos ministerios y comisiones especializadas y algunas ciudades, han introducido sucesivas políticas de promoción de transición energética y vehículos eléctricos, utilizando políticas públicas como la adquisición gubernamental y subsidios financieros. En el año 2017 fue implementado un paquete de medidas más específicas con el fin de acelerar la adopción en el mercado y la innovación tecnológica. Entre los instrumentos más utilizados destacan la construcción de proyectos piloto, líneas de investigación y desarrollo, programas para el escalamiento industrial, subsidios para la compra de vehículos eléctricos, reducciones y exenciones fiscales, fácil acceso al mercado y construcción de infraestructura crítica (Yang Andrew Wu y otros, 2021).

Para los países industrializados esta reconfiguración internacional es clave. La industria automotriz vuelve a convertirse en una industria de alta tecnología, en donde convergen las dos transiciones tecnológicas, esto es la manufactura avanzada digitalizada y la transición energética para la reducción de emisiones. Entre 2019 y 2022, las ventas globales de automóviles eléctricos se quintuplicaron, superando los 10 millones de unidades y la velocidad de esta transformación coincide con los cuellos de botella de suministro y dificultades geopolíticas (The Economist, 2023b).

Los fabricantes de automóviles están pasando de vehículos convencionales a vehículos eléctricos altamente sofisticados, generando innovaciones disruptivas y la entrada de nuevos actores. Entre las principales características de esta industria se pueden destacar: cambio en la tecnología de motores de combustión interna por vehículos alimentados por baterías de iones de litio; características avanzadas de sistemas de asistencia al conductor y trenes de potencia eléctricos; desarrollo de *software*, conectividad y sistemas, que incluyen entretenimiento y computadoras de alto rendimiento.

Esta mayor conectividad de los vehículos está aumentando el enfoque de la industria en los servicios de tecnologías de la información. Desde el año 2010, se han canalizado cerca de \$280 mil millones en soluciones innovadoras de *hardware* y *software* automotriz y cerca de mitad de esta inversión se ha destinado a vehículos eléctricos. Por su parte, los mercados de capital han recompensado estas inversiones, dado que los fabricantes y los proveedores de componentes han alcanzado, en el periodo de marzo de 2020 a enero de 2022, un retorno para los accionistas del 79%, superando a las empresas de otros sectores dinámicos. Estos resultados fueron aún más significativos para las nuevas empresas, como NIO, Tesla y otros startups de vehículos eléctricos, cuyo retorno superó el 250% (Hensley y otros, 2022).

Recuadro 1

La ruta de Tesla hacia la producción de los vehículos eléctricos

En 2011, Tesla declaraba que deseaba convertirse en la compañía de automóviles más convincente del siglo XXI, acelerando la transición mundial hacia los vehículos eléctricos. La empresa ha logrado irrumpir en una industria con enormes barreras de entrada. Se ha caracterizado por privilegiar un modelo de fabricación focalizado en unos pocos modelos y mantener costos competitivos. El año 2022, Tesla alcanzó márgenes operativos del 17%. Entre los fabricantes de automóviles no especializados, solo Porsche que produce menos de 1 millón de automóviles al año igualó su rendimiento.

La ambición de Tesla es dominar la industria automotriz a través de los sistemas de conducción autónoma, sin embargo, la competencia de las nuevas empresas asiáticas es muy férrea. Tesla mantiene, por ahora, una ventaja sobre sus competidores más establecidos en baterías, *software* y productividad manufacturera. Esta estrategia parece creíble para los inversionistas, que valoran a Tesla en más de \$900 mil millones. Esto es menos que los más de \$1 billón a principios de 2022, pero aún es más que los nueve fabricantes de automóviles más valiosos juntos.

Los otros actores establecidos en el mercado están avanzando aceleradamente por electrificar sus gamas de productos y emular el enfoque verticalmente integrado de producción de Tesla. Se ha desatado una ola de nuevos competidores de vehículos eléctricos, muchos de ellos chinos, todos tratando de ser los nuevos líderes del mercado.

Fuente: Elaborado sobre la base de The Economist (2023c).

C. Carrera para desarrollar cadenas de suministro nacionales

La Ley de Reducción de la Inflación ilustra otra tendencia global que remodela la industria de las baterías desatando una carrera para fortalecer y crear industrias de baterías nacionales integradas verticalmente con materiales críticos producidos en lo posible localmente o en países afines. La legislación de Estados Unidos, a través del IRA, ofrece incentivos de hasta \$7500 para la compra de vehículos eléctricos nuevos fabricados en el país, Canadá o México y con estrictos requisitos de contenido local. Por ejemplo, para calificar a la mitad del monto del incentivo, los vehículos eléctricos deben contener paquetes de baterías ensamblados en América del Norte. Para calificar para la otra mitad, una cierta porción de los minerales críticos utilizados en las baterías debe provenir de naciones con las que tiene acuerdos de libre comercio. Este requisito se introducirá gradualmente y alcanzará el 80 % en 2029.

Mientras tanto, la Unión Europea, a través de la Alianza Europea de Baterías y la Alianza Europea de Materias Primas, ha establecido varias medidas para asegurar el abastecimiento del litio y otros minerales críticos para la transición energética. En el caso de la India, antes de aprobar y otorgar incentivos a los proyectos de baterías, el gobierno federal requiere garantías de que se cumplirán ciertos umbrales de contenido local.

Al mismo tiempo, las naciones con materias primas críticas buscan aprovechar sus reservas para construir industrias de baterías nacionales. Indonesia, por ejemplo, que suministra un tercio del níquel refinado del mundo, está implementando nuevos procesos, como la lixiviación con ácido a alta presión, para refinar más níquel apto para baterías y, además, ha prohibido las exportaciones de minerales en bruto no procesado, de acuerdo con la Ley de Minería de 2009, con el objetivo de incentivar la creación de una capacidad de refinación que permita avanzar al país a lo largo de la cadena de valor⁴ (I.E.C. 2020). Luego de una breve suspensión de esta política indonesia y su reintroducción en 2020, se ha observado un aumento de la inversión extranjera directa en el sector, con el desarrollo de refinerías y fundiciones de níquel, y un aumento de las exportaciones del mineral refinado (FMI, 2023).

En este contexto, es plausible que las naciones con grandes reservas de litio, como es el caso de los países del triángulo del litio, quieran participar de las ganancias generadas por el auge de las baterías recargables. La extracción, el procesamiento inicial y la refinación de litio representan cerca del 25% al 30% de las ganancias de la cadena productiva de las baterías de iones de litio. Luego, la fabricación de ánodos, cátodos y electrolitos representa entre el 25% al 30% de las ganancias, y la producción de celdas y baterías ensambladas representa entre el 40% al 50% de las ganancias de la cadena de valor. Considerando el alto nivel de especialización y sofisticación tecnológica, la cadena de valor de las baterías de iones de litio se caracteriza por una concentración de mercado al interior de cada eslabón, destacando las empresas de China, Japón y República de Corea (Hocking y otros, 2016).

La participación de los países del triángulo del litio se circunscribe en la actualidad a la producción de cloruro, carbonato e hidróxido de litio. Para fabricar los componentes de las celdas de baterías de iones de litio se requieren otros elementos, que dependen del tipo y composición de la batería, como níquel, cobalto, manganeso, aluminio, silicio, estaño, titanio y grafito. Estos recursos, que se obtienen de la corteza terrestre o recuperadas del agua, han sido considerados minerales críticos para la transición energética, principalmente el cobalto, el grafito natural y el silicio (metal). En los países del triángulo del litio y de América del Sur existen importantes reservas de estos minerales, destacando las

⁴ Un consorcio de empresas estatales, incluida una empresa minera que posee una parte importante de las reservas de níquel del país, firmó un memorando de entendimiento con LG Energy Solution para invertir en un consorcio de \$ 9 mil millones para procesar el metal y fabricar materiales catódicos, celdas y baterías terminadas. También se firmó un MOU con Contemporary Ampere Technology (CATL) de China, conglomerado que también participa en un consorcio con Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB).

reservas de cobalto en Brasil, Chile⁵ y Perú, los depósitos de grafito en Brasil y las provincias argentinas de Catamarca, Córdoba, La Rioja y San Luis⁶, los recursos de silicio en las provincias de Córdoba, San Juan y San Luis y Entre Ríos.

En este rápido proceso de reorganización de las cadenas de valor de la industria del litio, aunque con altos niveles de incertezas y complejidad, se abren nuevas oportunidades para los países del triángulo del litio. Para ello es necesario una combinación consistente de políticas que promuevan la expansión de una producción sostenible, mayor valor agregado, en un marco de alianzas público-privadas para desarrollar nuevas capacidades, promover inversiones extranjeras y transferir nuevas tecnologías.

D. Oportunidades de colaboración en un mercado en expansión

Los tres países del triángulo del litio cuentan con un conjunto de políticas dirigidas a agregar valor a este mineral, que son distintas y específicas en función de los actores y los marcos normativos e instrumentos establecidos. Una primera apreciación del marco institucional de cada uno de los países del triángulo del litio no permite esperar una convergencia espontánea hacia un mercado regional más integrado. En el cuadro 3, se muestran las principales características de los distintos marcos normativos, las estrategias productivas y el sistema de investigación y desarrollo en Argentina, Bolivia (Estado Plurinacional de) y Chile.

Cuadro 3
Marcos normativos para la explotación del litio e instrumentos y mecanismos para la creación de capacidades para la agregación de valor a ese recurso en los países del triángulo del litio

Marco normativo/ países	Argentina	Bolivia (Estado Plurinacional de)	Chile
Régimen de gobierno	Federal	Centralizado	Centralizado
Modalidades de explotación	Concesión de la explotación a empresas privadas Provincia de Jujuy: participación accionaria de empresa del estado provincial	Empresa pública en asociación con empresas privadas (extranjeras)	Convenio entre la CORFO y empresas privadas Posibilidades habilitadas que no están vigentes: explotación estatal; contrato especial de operación del litio
Cobertura de la normativa	Restringida a la explotación del recurso	Explotación del recurso y su industrialización en las actividades del encadenamiento productivo hacia adelante	Concentrada en la explotación del recurso, con reserva de cuota a precio preferencial para proyectos de industrialización del recurso
Estrategia productiva: encadenamientos productivos hacia atrás	Concesión a empresas privadas	Empresa conjunta, asociación de Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) con empresas privadas (extranjeras) Plantas piloto de YLB	Convenios con empresas privadas
Estrategia productiva: encadenamientos productivos hacia adelante	Empresa conjunta en asociación con empresa privada (extranjera) Empresa mixta (YPF Tecnología (Y-TEC))	Plantas piloto de YLB	Licitación para la instalación de empresas privadas

⁵ El cobalto en Chile, en que se han explotado depósitos del tipo vetas, brechas y ocasionalmente mantos, está en las regiones de Atacama, Coquimbo y Metropolitana. El potencial de producción de cobalto de Chile podría llegar a alrededor de 25.000 toneladas anuales de cobalto.

⁶ Además, el grafito grado batería se puede producir artificialmente a partir del coque que abunda en Argentina.

Marco normativo/ países	Argentina	Bolivia (Estado Plurinacional de)	Chile
Régimen de gobierno	Federal	Centralizado	Centralizado
Sistema de investigación y desarrollo (I+D)	Sistema descentralizado: - I+D del SNCyT - Centro de investigación tripartito (CONICET, U N de Jujuy y Centro de I&D en Mat. Avanzados y Alm. de Energía de Jujuy) - CONICET. Litio definido como tema estratégico: formación de recursos y financiamiento de proyectos	Centros de investigación de YLB Apoyo a la formación y a la investigación en universidades nacionales	Sistema universitario Licitación para la creación de centros de I+D financiados por empresas productoras de litio: Instituto de Tecnologías Limpias, Centro Tecnológico de Economía Circular, Centro para el Desarrollo de la electromovilidad

Fuente: CEPAL (2022a) sobre la base de información de León y otros (2020).

En la diversidad de enfoques, cabe mencionar las estrategias para desarrollar capacidades que siguieron Argentina y Chile. En el caso de Argentina se ha privilegiado la ampliación de la explotación a través de proyectos privados y, por otra parte, se ha recurrido a empresas e instituciones públicas para promover nuevas capacidades tecnológicas. Las provincias de Argentina, en general, han focalizado sus esfuerzos en la atracción de inversión extranjera directa para el desarrollo de nuevos proyectos y han mostrado menor interés en involucrar a sus empresas públicas. En contraste, se han utilizado las capacidades de las empresa pública o mixta para desarrollar nuevas competencias tecnológicas, operativas y organizacionales principalmente en el segmento de exploración y/o explotación de litio. Un caso emblemático corresponde al caso de YPF, que se presenta en el recuadro 2, donde se pone de manifiesto las capacidades operativas y tecnológicas desarrolladas por la empresa a partir de las actividades en la industria de hidrocarburos. En este caso, se argumenta que, a partir de la experiencia en el territorio y a su red de proveedores, la empresa podría acelerar los nuevos proyectos y facilitar la resolución de los desafíos de naturaleza productiva y ambiental que enfrenta actualmente el desarrollo de la minería de litio en salares (Freytes y otros, 2022).

Recuadro 2 El rol de la empresa YPF en el litio

Se ha manifestado públicamente la intención de que YPF forme parte de una estrategia nacional del sector litífero argentino, lo que finalmente se ha consolidado con la conformación de la filial YPF-Litio en 2021. La compañía ha incursionado en años recientes en diversas unidades del negocio energético distintas a la exploración y explotación de hidrocarburos: YPF Luz (generación de energía térmica y renovables), YTEC en el Consorcio H₂ (Hidrógeno) y diversos proyectos en torno a las baterías de ion-litio.

Pero la relevancia de las iniciativas aguas abajo (baterías) en relación con el dominio de una tecnología clave en la transición hacia la electromovilidad, existe un potencial considerable para que YPF pueda insertarse virtuosamente en el segmento aguas arriba (exploración y extracción). Esta potencial inserción de la empresa mixta con participación mayoritaria del Estado nacional no implica necesariamente la operación inmediata de una mina, sino que puede escalarse desde las actividades de exploración (en asociación con las empresas provinciales en sus áreas disponibles) y en la provisión de servicios o insumos que requiere la operación de litio en salmueras.

En cuanto a las capacidades requeridas para llevar a cabo actividades aguas arriba, pueden identificarse en YPF:

- Capacidades organizacionales: una estructura corporativa sobre la cual montar una estrategia litífera como se ha desarrollado en otras ramas (YPF Luz, YPF Química o YPF Agro, por ejemplo).
- Capacidades tecnológicas: YPF y su división Y-TEC cuentan con altas capacidades en las áreas de ingeniería y química. Ello les ofrece ventajas competitivas respecto a otros jugadores del sector para desarrollar innovaciones de proceso y producto.
- Capacidades operativas: YPF es una empresa de alcance nacional y cuenta con una red de proveedores que, en gran medida, se desempeñan en actividades vinculadas con la industria litífera: ingeniería de detalle, laboratorios químicos, desarrollo de modelos geológicos, perforaciones, construcción de ductos, obras civiles, bombas, estudios ambientales.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información Freytes y otros (2022).

Por otra parte, la reciente estrategia nacional del litio de Chile considera una visión estratégica de largo plazo en todo el ciclo productivo, desde la exploración hasta la agregación de valor, además de regulaciones para asegurar la sostenibilidad y la reinversión en el desarrollo del país. La estrategia, además de promover el liderazgo internacional mediante la articulación con actores nacionales e internacionales, privilegia el rol del Estado con su involucramiento en todo el ciclo industrial mediante diversas iniciativas, destacando la creación de la Empresa Nacional del Litio y el Comité CORFO de Litio y Salares, la creación de capacidades por medio de un Instituto Tecnológico y de Investigación Público de Litio y Salares, el desarrollo de asociaciones público-privadas para el crecimiento de la industria y exploración de recursos. Se señala, además, que la sostenibilidad política y social se realizará a través del involucramiento de territorios y comunidades y de garantizar una adecuada modernización del marco institucional para la industria, donde los actores públicos principales en la Estrategia Nacional del Litio serán las empresas CODELCO y ENAMI como representantes del Estado. De esta manera se promoverá una mayor producción sostenible en el Salar de Atacama y, además, nuevos proyectos en otros salares del país, considerando de manera prioritaria la participación de las comunidades indígenas de los territorios (Gobierno de Chile, 2023).

Considerando esta heterogeneidad institucional entre los países del triángulo del litio, es posible plantear, como punto inicial, una plataforma de colaboración regional organizada sobre tres ejes principales: colaboración tecnológica, colaboración productiva y colaboración financiera.

En primer lugar, la plataforma de colaboración tecnológica debe convocar al sistema de investigación y desarrollo para abordar los desafíos tecnológicos de la cadena de valor aguas arriba, tomando como base el ecosistema de los salares, y de la cadena de valor aguas abajo, abordando tecnologías asociadas a las baterías estacionarias, las baterías para vehículos eléctricos y sus componentes. Particular relevancia son los desafíos tecnológicos de los procesos de extracción directa, explotación integral de los salares con énfasis en la sustentabilidad social y ambiental, y sus encadenamientos productivos. En este aspecto, es urgente establecer mecanismos de coordinación de la comunidad científica asociada a la red de centros de investigación que están siendo apoyadas por los sistemas nacionales de ciencia y tecnología del triángulo del litio.

En segundo lugar, la plataforma de colaboración productiva debe convocar a las instituciones de fomento productivo para sentar las bases de un clúster de exploración, producción y refinación que permita una mayor diversificación de productos de litio en cuanto a sostenibilidad y calidad. Es prioritario es ampliar las capacidades en torno a la minería del litio y sus derivados a través de programa de innovación tecnológica, desarrollo de proveedores (insumos, equipos, servicios de ingeniería, comercialización y logística), creación de nuevas empresas, atracción de empresas internacionales y programas de desarrollo territorial. Por ejemplo, es imprescindible articular instrumentos y programas actualmente disponibles de instituciones como el Ministerio de Desarrollo Productivo de Argentina y la CORFO de Chile.

En tercer lugar, la plataforma de colaboración financiera debe procurar constituir líneas de financiamiento y un fondo de inversiones para las cadenas de valor en torno al litio, articulando y apalancando líneas de financiamiento preferencial de la banca multilateral para la transición energética, destacando las líneas de financiamiento de instituciones tales como el Banco Mundial, el BID, la CAF y el Banco Europeo de inversiones, y considerando el rol de la banca nacional de desarrollo, como el BNDES en Brasil.

Estos nuevos esfuerzos pueden impulsar un nuevo tipo de políticas industriales para la creación de capacidades productivas y tecnológicas en torno a dos clústeres principales: de exploración y producción de compuestos de litio (carbonato e hidróxido de litio); y de componentes de baterías de iones de litio para vehículos eléctricos y almacenamiento estacionario de energías renovables.

En el primer clúster de exploración y producción de litio refinado (cadena de valor aguas arriba), se abordarán los siguientes objetivos: diferenciación de la producción refinada (*de-commodification* a través de la producción de carbonato de litio grado batería); sostenibilidad ambiental a través del desarrollo de la geohidrología de salares (gestión y uso del agua) y tecnologías de extracción directa para reducir huella ambiental; desarrollo de proveedores de bienes y servicios de ingeniería. En este ámbito, el ecosistema salar representa una etapa crítica de capacidades en esta cadena de valor de compuestos de litio, ya que es donde se concentra gran parte del valor asociado a la extracción y producción del mineral.

En el segundo clúster de la cadena de valor de la fabricación de baterías iones de litio (cadena de valor aguas abajo), se analizará la viabilidad de las siguientes actividades: fabricación de los componentes de las celdas (ánodo, cátodo, electrolito y separadores), fabricación de celdas y producción de baterías para fines específicos. Como se mencionó, los cuellos de botella en la cadena de valor aguas abajo, como las baterías estacionarias, las baterías para vehículos eléctricos y sus componentes, representan un desafío para la adopción masiva de tecnologías basadas en el litio y se requiere investigación y desarrollo para superarlos.

Para avanzar en una estrategia de desarrollo de clúster, se propone articular un conjunto de políticas públicas, distinguiendo dos modelos principales: políticas públicas para sectores basados en recursos naturales; y, políticas públicas para sectores de base tecnológica. Para cada uno de estos modelos se abordarán los principios de las políticas, los instrumentos en los ámbitos del fomento empresarial, ciencia, tecnología e innovación, financiamiento de inversiones y fortalecimiento institucional.

II. El litio factor clave para la electromovilidad y otras industrias

A. Reservas y producción de litio

Un panorama mundial sobre las reservas y la producción se presenta en el cuadro 4, donde Argentina y Chile representan el 46% de las reservas y el 30% de la producción mundial. Cabe destacar que, entre el 2010 y 2023, las reservas mundiales se han triplicado como resultado de las importantes actividades de prospección y exploración en países como Australia, Argentina, China y Estados Unidos. En el mismo periodo, la producción global ha crecido 10 veces, y los países que más han aumentado su producción en términos absolutos son Australia, Chile y China.

Cuadro 4
Producción y reservas mundiales de litio
(En toneladas)

País	Reservas 2010	Reservas 2023	Producción mina 2009	Producción mina 2023 ^a
Argentina	800 000	3 600 000	2 200	9 600
Australia	580 000	6 200 000	4 400	86 000
Brasil	190 000	390 000	110	4 900
Canadá	180 000	930 000	480	3 400
Chile	7 500 000	9 300 000	7 400	44 000
China	540 000	3 000 000	2 300	33 000
Estados Unidos	38 000	1 100 000	No revelado	No revelado
Portugal	N A	60 000	490	380
Zimbabue	23 000	310 000	350	3 400
Otros países	-----	2 800 000	-----	-----
Total mundial	9 900 000	28 000 000	18 000(sin EEUU)	180 000 (sin EEUU)

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de USGS, Mineral Commodity Summaries, enero de 2010 y enero de 2024.

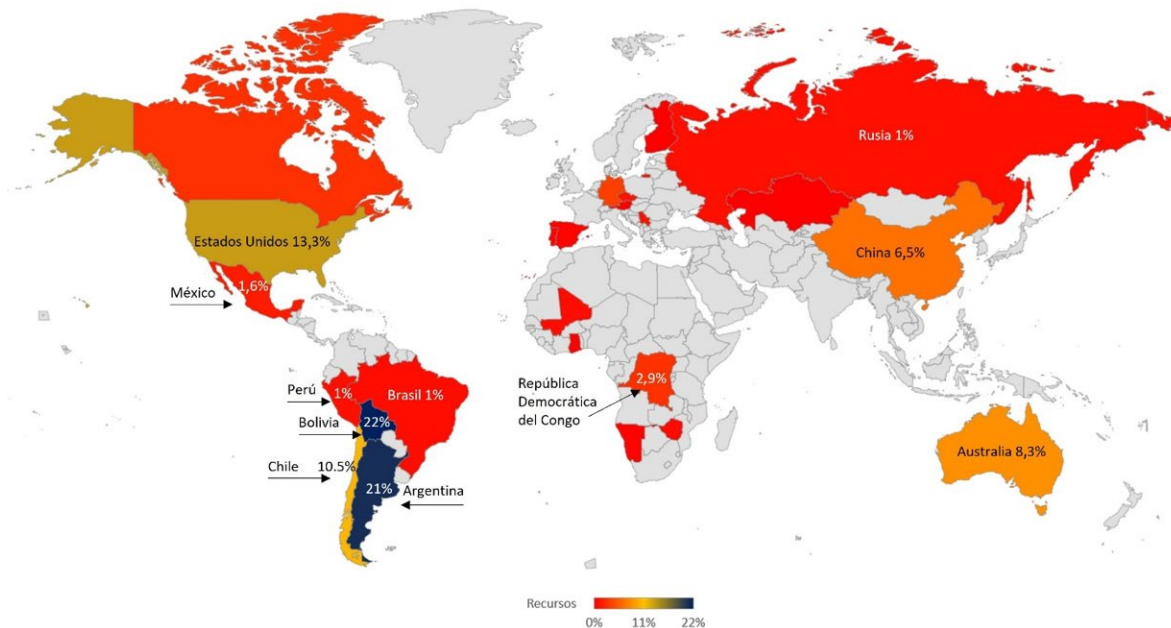
^a Las cifras de la producción mina de 2023 son valores estimados.

Nota: Se recuerda que los 'recursos identificados' se distinguen de las 'reservas'. Estas últimas, en resumen, son los recursos confirmados como factibles para explotación a escala industrial.

El litio está presente en yacimientos minerales, destacando tres fuentes principales. En primer lugar, las salmueras con el 66% de la producción que incluye salares, geotermales y petroleros. En segundo lugar, las pegmatitas con el 26% de la producción que considera el espodumeno, petalitas, lepidolitas, amblogonita y eucryptita. En tercer lugar, las rocas sedimentarias con el 8% de la producción donde se encuentran las arcillas, toba volcánica y rocas evaporitas lacustres. La extracción de litio a partir de salmueras, hasta ahora la forma de explotación más rentable, está circunscrita a unas pocas localizaciones, destacando el triángulo del litio —Argentina, Bolivia y Chile— que concentra más del 53% de los recursos mundiales y cerca del 85% de los depósitos de salmueras (USGS 2023)⁷. Cada salmuera requiere tratarse de forma particular, según su composición química y los componentes que la contiene como potasio, sodio, calcio, magnesio, boro y bromo, y donde la concentración puede variar entre 0,02 y 0,2 % de litio (Garcés, 2017).

Las salmueras más importantes, en términos de calidad y volumen, se encuentran en Chile (Salar de Atacama) con el depósito de mayor concentración en litio hasta ahora conocido, en Bolivia (Salar de Uyuni) con el más grande lago salino de 10 mil kilómetros cuadrados, en Argentina (Salar del Hombre Muerto) el más grande del país transandino y en otros lagos salinos ubicados en Estados Unidos, China (provincia de Qinghai), en el Tíbet y Rusia. La explotación más competitiva se encuentra en las salmueras chilenas del Salar de Atacama, donde se conjugan, además del grado de concentración de litio de la salmuera extraída, los factores climáticos y geográficos asociados a la radiación solar y acceso a infraestructura de transporte.

Mapa 1
Mundo: principales países con recursos identificados de litio, 2023
(En porcentajes)



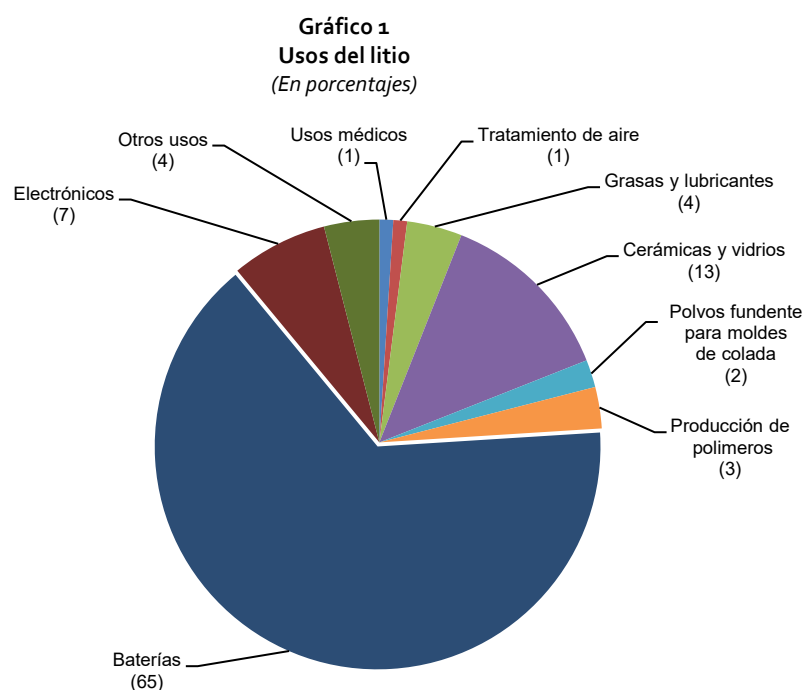
Fuente: CEPAL sobre la base de datos de USGS, Mineral Commodity Summaries, enero 2024.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

⁷ Los yacimientos de pegmatitas implican procesos de molienda, separación y purificación de alto costo, lo realizan principalmente Estados Unidos, Australia, China y Rusia (USGS 2023).

B. Usos y aplicaciones del litio

Los usos más significativos del litio y sus compuestos están relacionados con diversas aplicaciones de almacenamiento de energía. Como se aprecia en el gráfico 1, los principales usos están asociados a la producción de baterías de vehículos eléctricos (65%), otras baterías de almacenamiento energético (11%) y artículos electrónicos (USGS y COCHILCO, 2023). La cadena de valor de las baterías de almacenamiento estacionario, además de la cadena de valor de la fabricación de baterías de vehículos eléctricos, corresponde a un segmento donde existen oportunidades para desarrollar nuevas capacidades en la región.



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del USGS (2023) y COCHILCO (2023).

Otros nichos de producción de alto valor agregado están asociados al ámbito de la química fina de materiales de litio con diversos usos como se presenta en el cuadro 5, donde se mencionan como ejemplos aplicaciones en industrias tan diversas como la del caucho, cerámicas, vidrios, grasas y lubricantes, materiales de construcción, aluminio, acero y farmacéutica.

El litio, según su composición química, puede presentarse en carbonato, hidróxido, cloruro y otros compuestos que incluyen concentrados, butil-litio, bromuro de litio y litio metálico. Actualmente, el carbonato es el producto de mayor utilización industrial con el 61% de todas las aplicaciones, seguido del hidróxido de litio con un 36% (COCHILCO, 2023). Estos productos se clasifican en el mercado internacional por el grado de pureza, el grado técnico y el grado batería, tal como se presenta en el recuadro 3.

Cuadro 5
Aplicaciones del litio en el ámbito de la química fina

Usos	Tipo de compuesto	Ventajas
Caucho sintético	Butil-litio del litio metálico	Aumenta la resistencia a la abrasión
Cerámicas	Concentrados de litio o carbonato de litio	Aumenta la tensión superficial, disminuye el punto de fusión y mejora las propiedades de escurrimiento
Vidrios	Concentrados de litio o carbonato de litio	Disminución del punto de fusión y la viscosidad de los vidrios durante su tratamiento térmico, y una menor dilatación térmica
Grasas y lubricantes	Hidróxido de litio	Permite que los lubricantes soporten un amplio rango de temperatura, presión, y sean más insolubles ante la humedad
Cementos y materiales de construcción	Carbonato de litio	Mayor resistencia y compresión, y un fraguado acelerado
Producción de aluminio	Carbonato de litio	Menor temperatura de operación, reduce la viscosidad del baño de criolita, disminuye el consumo de energía y reduce la emisión de flúor al ambiente
Industria del acero	Carbonato de litio	En los procesos de polvo de colada continua permite una mayor velocidad y fluidez en el proceso de moldeado
Acondicionadores y deshumidificadores de aire	Cloruro o del bromuro de litio	Propiedades higroscópicas que permiten absorber la humedad del ambiente
Industria farmacéutica	Li ₂ CO ₃ , LiCl, LiBr y LiOH	Nuevos usos de elementos farmacéuticos activos

Fuente: Elaboración propia.

Recuadro 3
Los principales compuestos de litio producidos en Chile

El hidróxido de litio, grado industrial, contiene un 56,5% mínimo de LIOH, es un producto químico que, en Chile, es producido por SQM Lithium (SQM). Se trata de una sal inorgánica que se presenta en forma de sólido blanco cristalino altamente soluble en agua y es un compuesto muy corrosivo, que se utiliza en diversas aplicaciones industriales, como en la producción de baterías de iones de litio, la fabricación de lubricantes y grasas para alta temperatura, la producción de catalizadores y la fabricación de vidrio y cerámica, entre otras. Por ser grado industrial, solo está destinado a uso en procesos industriales y no para aplicaciones farmacéuticas o alimentarias.

El carbonato de litio es una sal blanca e inodora compuesta por litio, carbono y oxígeno, cuya fórmula química es Li₂CO₃. Se utiliza en diversas aplicaciones, como por ejemplo en la producción de baterías de iones de litio, cerámicas, vidrios especiales, lubricantes y en la síntesis de compuestos químicos. En Chile, es producido por SQM y Albemarle. En todos los carbonatos de litio existen variantes según la solicitud del comprador con especificaciones de pureza, granulometrías y características químicas.

El carbonato de litio de grado técnico tiene pureza mínima del 99%, es producido en Chile por ambas empresas. Se usan en diferentes aplicaciones industriales, como la fabricación de baterías para vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos.

El cloruro de litio, de producción primaria, sirve como materia prima para la producción de litio metálico. También se usa en fundentes, para aire acondicionado en el control de humedad y zeolitas. En Chile lo produce solo Albemarle, y se expende en un solo tipo.

El sulfato de litio para su conversión a hidróxido de litio se ha producido en Chile por SQM, en su Planta MOP H2 en el Salar de Atacama, a partir del 2022.

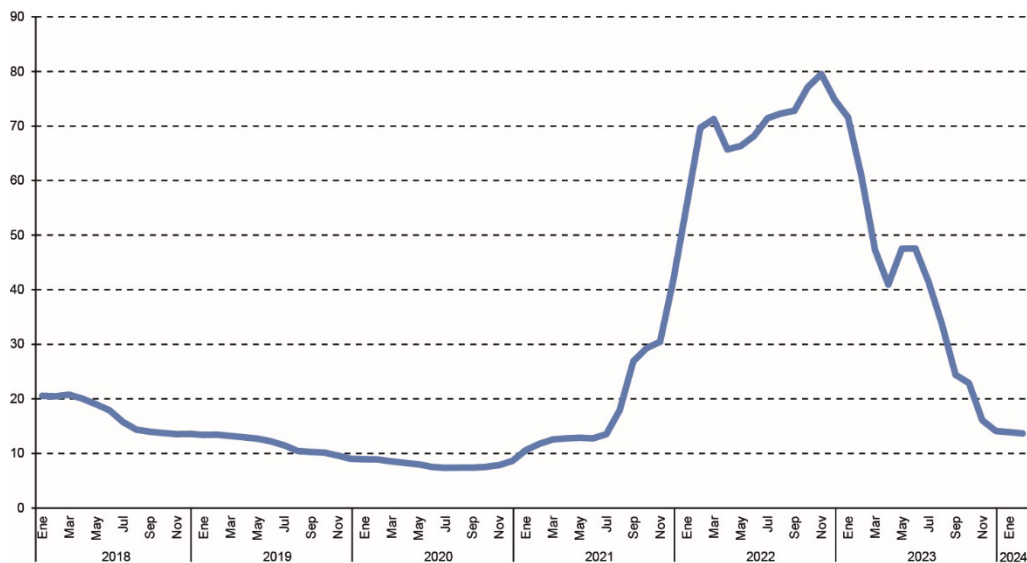
Fuente: Elaboración propia.

C. El mercado, la demanda y la oferta

Se ha señalado que el litio no se trata como un bien estándar o *commodity*, a diferencia del cobre que en su forma comercial se transa como cátodo grado A al 99,9% de pureza. El litio es un químico de especialidad, cuyos productos varían en sus especificaciones y purezas, por lo que es complejo definir un precio único de referencia. Sin embargo, los precios de los distintos compuestos guardan una alta

correlación debido a que los factores de oferta y demanda, donde se expresan los factores de abundancia o escasez, son comunes y se transan en gran volumen en los mercados internacionales (Ritchie, 2021). Una situación de desajuste temporal entre el crecimiento acelerado de la demanda, por una parte, y una pausada expansión de la oferta productiva, por otra, se ha traducido en un aumento exponencial de los precios. En el gráfico 2 se muestra que, en el periodo 2015 y 2023, el precio del litio ha experimentado un fuerte crecimiento entre 2021 y 2022. Desde 2023 y hasta principios de 2024, la implementación y los anuncios de nuevos proyectos de extracción de litio, junto con la percepción de que la adopción masiva de vehículos eléctricos no será tan rápida como se esperaba, han contribuido en gran medida a la reducción de los precios a niveles similares a los valores de 2021.

Gráfico 2
Precio internacional del litio 2018-2024
(En dólares corrientes/kilogramo)



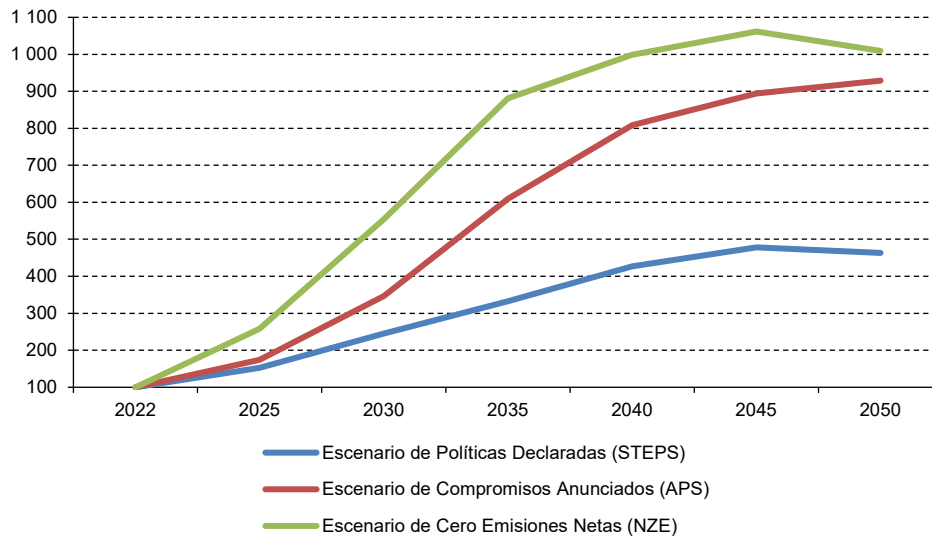
Fuente: CEPAL sobre la base de datos de Bloomberg.

Nota: El precio considerado es un promedio entre los precios del litio en los mercados de Estados Unidos y de China.

La demanda de litio ha estado fuertemente influenciada por las ventas de vehículos eléctricos (VE), que superaron los 10 millones en el año 2022. Esto equivale al 14% de todos los coches nuevos vendidos en 2022, frente al 9% en 2021 y menos del 5% en 2020. Esta tendencia ha continuado en 2023, y se esperaba llegar a los 14 millones de VE vendidos, es decir, un crecimiento del 35%. En distintos escenarios de largo plazo aceleración del crecimiento de la demanda de litio, la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) estima que la demanda de litio se multiplicaría por al menos 3 veces en 2035 en el escenario más conservador para consecución de políticas actualmente declaradas, y tendría que aumentar en más de 10 veces los valores de 2022 en un escenario para alcanzar cero emisiones netas de carbono en 2050 (IEA, 2023), conforme se observa en el gráfico 3.

Las instalaciones de energía solar fotovoltaica siguen batiendo récords y la energía eólica reanuda su crecimiento tras dos años moderados. Esto ha llevado no solo a un aumento en la demanda de minerales críticos, sino también a un aumento de la infraestructura de almacenamiento a través de baterías estacionarias. La demanda total del litio será cada vez más explicada por su uso en tecnologías de la transición hacia energías renovables, específicamente en baterías de iones de litio para vehículos eléctricos y para el almacenamiento de energía estacionaria. La IEA estima que la demanda de litio explicada por la fabricación de baterías de iones de litio pasaría de 56% en 2022 a más de 75% en todos los escenarios a partir de 2030.

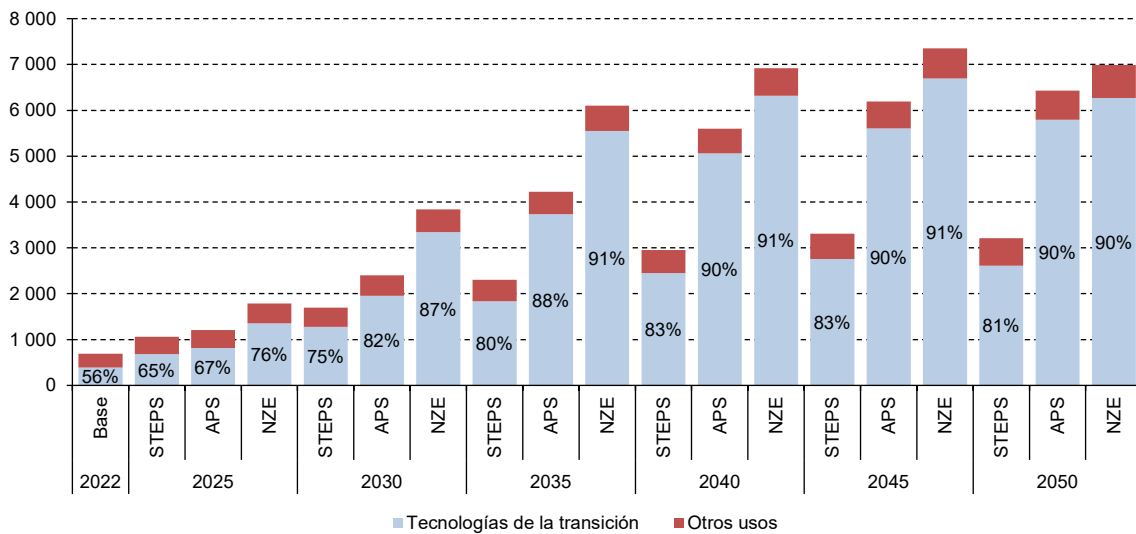
Gráfico 3
Crecimiento de la demanda de litio 2022-2050
(Índice año base 2022=100)



Fuente: CEPAL sobre la base de datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), Critical Mineral Demand Dataset, actualización de julio de 2023 (IEA 2023b).

Nota: Los tres escenarios son los utilizados y definidos por la IEA.

Gráfico 4
Proyección de la demanda total de litio por uso
(En kilotoneladas de LCE)



Fuente: CEPAL sobre la base de datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), Critical Mineral Demand Dataset, actualización de julio de 2023 (IEA 2023b).

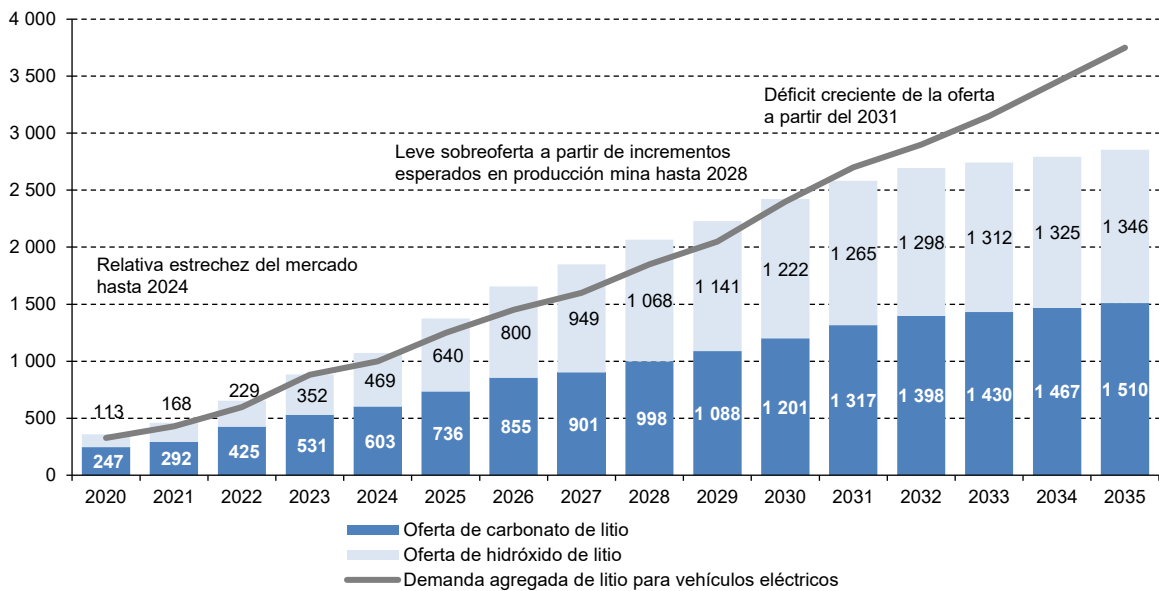
Nota: Para el cálculo se ha considerado 1kg de litio = 5,32 kg de carbonato de litio equivalente (LCE). Los tres escenarios son los utilizados y definidos por la IEA.

Un estudio de la Comisión Chilena de Cobre (COCHILCO) compara la oferta proyectada de litio, a partir de los proyectos de litio en operación y previstos, con las estimaciones de demanda del mineral específicamente para la fabricación de baterías de iones de litio. Desde el lado de la oferta de litio, se

advierte en la actualidad un balance muy ajustado con la demanda hasta 2024, por lo que cualquier disrupción en las actuales operaciones o retrasos en la puesta en marcha de nuevos proyectos pueden causar déficits temporales. De acuerdo con los antecedentes disponibles, entre los años 2025 y 2030, y bajo el supuesto de la entrada de los nuevos proyectos en operación, se espera una leve sobreoferta.

Sin embargo, a partir de 2030, la situación se vuelve más incierta, ya que se espera un creciente déficit, exacerbado por la mayor participación prevista de hidróxido de litio en la demanda del mineral para baterías de iones de litio que aumentaría del 38,7% en 2022 al 54% en 2035, superando, por lo tanto, la demanda proyectada de carbonato de litio. No obstante, este déficit de oferta podría mitigarse mediante nuevos proyectos y, sobre todo, mediante estrategias de reciclaje y avances tecnológicos más eficientes o la sustitución por otros materiales (Jiménez y Sáez, 2022).

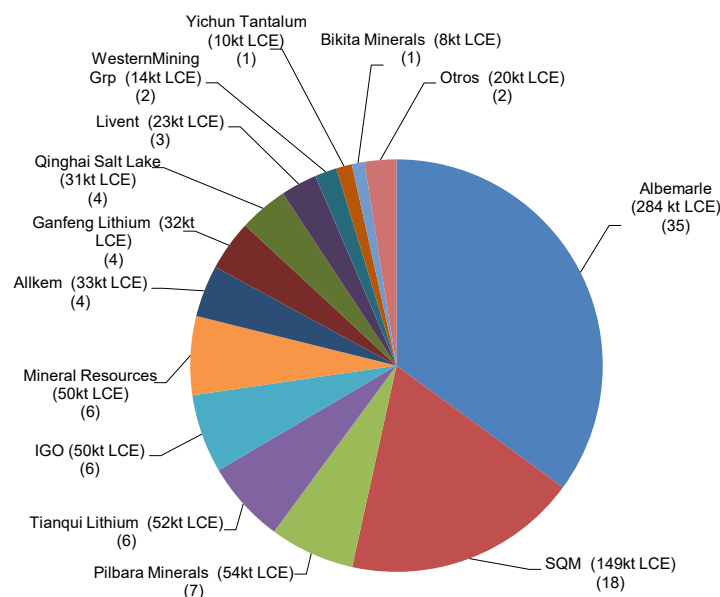
Gráfico 5
Proyección de oferta de litio por compuestos y la demanda agregada de litio para vehículos eléctricos 2020-2035
 (En kilotoneladas de LCE)



Fuente: Elaboración propia sobre el estudio de COCHILCO (2023).

La producción mundial de litio está concentrada en un número reducido de empresas, donde los dos mayores productores de litio (Albemarle y SQM) representaron el 53% de la producción mundial en el año 2022. Solo seis empresas controlan casi el 80% de todo el litio que se produce en el mundo y se espera que las reservas de estos grandes productores comenzarán a disminuir, por lo que requieren reponer sus reservas para mantener el mismo nivel de producción. En el gráfico 6 se presenta la participación de mercado por empresa operadora, destacando Albemarle que lidera la producción por el control corporativo de la mina de Greenbushes en Australia y las operaciones en el Salar de Atacama en Chile.

Gráfico 6
Participación en la producción mundial por empresas productoras de carbonato de litio durante el 2022
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de S&P Market Intelligence (2022).

D. Huella de carbono, hídrica y energética de la producción de compuestos de litio

En relación con la dimensión ambiental de la producción de litio, existe evidencia de efectos diferenciados según la fuente de extracción, es decir, si se trata de salmuera o de espodumeno. Estudios que han comparado el ciclo de vida del litio para la producción de carbonato de litio e hidróxido de litio han concluido que los compuestos producidos a partir de una salmuera tienen una huella de carbono menor a la producida a partir de espodumeno (Kelly y otros 2021 y Jiang y otros 2020).

Un estudio de Minviro (Grant y otros 2020) realizó el análisis de ciclo de vida para la producción de hidróxido de litio a partir de salmuera, de Chile y Argentina⁸, y de espodumeno, de Australia y Portugal, refinados en China. El análisis abarcó todo el proceso de producción de los compuestos, desde la extracción del mineral, hasta la conversión química y transporte a los destinos de refinación de cada proyecto y un único destino de consumo final. El cuadro 6 entrega los resultados comparativos de la huella de carbono para la producción de hidróxido de litio. La producción de hidróxido de litio a partir de la salmuera del Salar de Atacama tendría menor huella de carbono que la del Salar de Hombre Muerto que se somete primero a un proceso de absorción, para luego realizar la evaporación.

⁸ El estudio considera etapas diferentes a depender del proyecto de origen del litio. Por ejemplo, considera el litio de salmuera de Argentina con concentraciones de 700ppm que pasa por una etapa previa de absorción con uso de fuentes energéticas como el gas natural y su transporte para refinación en los EE.UU. A su vez, el proyecto del Salar de Atacama utiliza principalmente energía solar para concentrar la salmuera en las piscinas de evaporación.

Cuadro 6
Comparación intensidad de CO₂ en la producción de hidróxido de litio
*(En toneladas de CO₂ por tonelada de LiOH*H₂O)*

Fuente del proyecto de litio	Salmuera chilena	Salmuera argentina	Espodumeno australiano/chino	Espodumeno portugués/chino
Intensidad en toneladas de CO ₂ por tonelada de LiOH*H ₂ O	5,0 tCO ₂ /tLiOH*H ₂ O	7,4 tCO ₂ /tLiOH*H ₂ O	14,8 tCO ₂ /tLiOH*H ₂ O	15,8 tCO ₂ /tLiOH*H ₂ O

Fuente: Elaboración propia según el estudio de Grant y otros 2020.

Los resultados también muestran que la producción de los compuestos a partir de espodumeno requieren más agua y energía que la extracción de litio de salmueras. Además, es necesario calcinar la roca a 900-1.000 grados Celsius y convertirla en una solución de sulfato de litio con la adición de ácido sulfúrico (calcineración ácida). La solución de sulfato de litio se puede convertir en carbonato de litio o en hidróxido de litio monohidratado. Toda esta suma de etapas hace que el litio de yacimiento de roca sea más contaminante que el proveniente de salmueras, con un consumo superior de agua y energía (véase el cuadro 7)⁹.

Cuadro 7
Comparación del consumo de energía y agua por compuesto de litio en salmueras y espodumeno
(En megajulio y litros por kilogramo)

Fuente del litio y compuesto producido	Salmuera chilena a hidróxido de litio (LiOH*H ₂ O como LCE)	Salmuera chilena a carbonato de litio (Li ₂ CO ₃)	Espodumeno australiano/chino a hidróxido de litio (LiOH*H ₂ O como LCE)	Espodumeno australiano/chino a carbonato de litio (Li ₂ CO ₃)
Consumo de energía	147 Mj/Kg	62 Mj/Kg	290 Mj/Kg	132 Mj/Kg
Consumo de agua	1 756 l/Kg	601 l/Kg	6 209 l/Kg	1 077 l/Kg

Fuente: Elaboración propia con datos de Sustainable Lithium, SQM, <https://www.sustainablelithium.com/project/life-cycle-of-lithium/> último acceso febrero de 2024.

Nota: Para la comparación los compuestos son medidos en carbonato de litio equivalente (LCE); Li₂CO₃ corresponde a 1 LCE; 0,88/LiOH*H₂O corresponde a 1 LCE.

En el caso de los estudios realizados con baterías de iones de litio, los resultados van en la misma dirección. Las baterías producidas a base de mineral de roca presentan diferencias sustantivas, en comparación con las producidas a base de salmuera (Jiang y otros 2020; Chordia y otros 2021; Arshad y otros 2022). Por ejemplo, una batería de litio-ferrofosfato (LFP) producida con litio a base de roca superaría en 17% el potencial de calentamiento global, medido en kilogramos de CO₂ equivalente, por sobre la misma batería LFP con litio a base de salmuera, y en 32% el potencial de acidificación, en kilogramos de SO₂ equivalente (Jiang y otros 2020).

⁹ La producción de carbonato de litio a partir de salmuera es aún más directa y con una huella de carbono también inferior en comparación con la producción del compuesto a partir de litio extraído de espodumeno.

III. Las cadenas de valor relacionadas con el litio y espacios para Chile y América del Sur

A. Los desafíos tecnológicos y ambientales de las cadenas de valor relacionadas con el litio

Antes de proponer las posibilidades de inserción de Chile en la cadena de valor de baterías de iones de litio, es importante señalar algunas consideraciones económicas, de organización industrial y tecnológicas para contextualizar las propuestas que siguen en los capítulos siguientes. Para efecto del análisis se consideran dos clústeres principales; por una parte, la cadena de valor aguas arriba o de exploración, extracción y producción de litio refinado y, por otra, la cadena de valor aguas abajo o la fabricación de baterías de iones de litio. Para estos clústeres, se analizarán las etapas de la cadena, desde la exploración y extracción del mineral, identificando oportunidades de mejora en cada proceso, hasta el uso final de productos de litio que dan mayor valor agregado a la industria a nivel global. Tal como se presenta en el cuadro 8, de los países del triángulo del litio, solo Argentina y Chile tienen producción industrial en el segmento de la producción aguas arriba.

En aquellos procesos que están presentes en los países del triángulo de litio, como lo son la exploración, explotación y refinación, existe un potencial para mejorar la eficiencia y competitividad agregando valor y optimizando las capacidades actualmente disponibles. El ecosistema salar es una etapa crítica de capacidades en la cadena de valor de la exploración, extracción y producción de litio refinado, ya que concentra gran parte del valor asociado a la extracción y producción del mineral. Además, el desarrollo de tecnologías de extracción y explotación integral de los salares, todavía en fase experimental, puede tener un impacto significativo en la sustentabilidad social y ambiental, y en la creación de encadenamientos productivos con comunidades locales y otros sectores económicos, que requieren de investigación adicional.

Cuadro 8
Situación productiva de los países del triángulo del litio

	Argentina	Bolivia (Estado Plurinacional de)	Chile
Principales salares	Tiene 16 salares, siendo el Salar de Arizaro el más grande con una superficie de 1.600 km ² , a una altura de 3.460 msnm.	Tiene 26 salares y lagunas saladas, siendo el Salar de Uyuni el más grande del mundo, con 10.000 km ² y una altura 3.650 msnm.	Tiene más de 56 salares y lagunas, siendo el Salar de Atacama es el más grande, con una superficie de 3.000 km ² y se encuentra a 2.300 msnm.
Situación productiva aguas arriba	Cuarto productor en el mundo. En el Salar del Hombre Muerto, FMC Lithium produce carbonato, fluoruro y cloruro de litio en Catamarca y Salta desde 1998. Luego se sumó el Salar del Rincón con Ady R. Lta, con carbonato de litio, siendo la primera en aplicar la técnica de absorción selectiva. El 2022 alcanzó una producción de 6.200 toneladas de litio, el 4,8% mundial.	Aún no ha entrado a comercializar a escala industrial. El país implementó un Plan de desarrollo del litio a fines de los 2010, pero enfrenta distintos desafíos de naturaleza tecnológica, condiciones climáticas y por la composición de sus salares.	Segundo productor mundial de litio. La extracción se realiza sólo en el Salar de Atacama, por dos empresas: Albemarle, que produce carbonato de litio, cloruro de litio, ambos grados técnicos, y carbonato grado batería; y, SQM que produce carbonato de litio e hidróxido de litio, en sus grado técnico y grado batería, y sulfato de litio. El 2022 alcanzó una producción de 39.000 toneladas de litio, el 30,2%, mundial.
Nuevos proyectos	Tiene 38 proyectos de los cuales hay 15 en etapa de prefactibilidad y cinco proyectos que entrarán en producción los próximos 5 años, que se localizan en la Subcuenca Oriental del Salar del Hombre Muerto, en los Salares de Centenario-Ratones, Salar de Caucharí y Pozuelos.	La Empresa Pública Nacional Estratégica de Yacimientos de Litio Bolivianos, YLB, anunció el proyecto a desarrollar por EDL en los salares de Pastos Grandes, Uyuni y Oruro en distintos convenios con empresas extranjeras.	Tiene dos proyectos en el Salar de Maricunga, a la espera de su aprobación medioambiental. Además, CODELCO, en el Salar de Maricunga, tiene en fase de desarrollo una campaña de exploración.

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los principales cuestionamientos a la industria del litio se refiere al método de evaporación, donde se evaporan grandes cantidades de agua de la salmuera, entre 20.000 m³ a 50.000 m³ diariamente, desde las enormes piscinas de evaporación que por medio de la energía solar logran concentrar el litio; es decir, más del 90% del agua de la salmuera extraída se evapora en un ambiente desértico. Grandes volúmenes de agua, 100-1000 m³ por tonelada de carbonato de litio, según el depósito, se evaporan, y se necesitan grandes vertederos para almacenar los residuos salinos. Desde el punto de vista económico, un proceso de evaporación que dure más de 18 meses para concentrar el litio en la salmuera, bajo ciertas condiciones climatológicas (precipitaciones, tasa de evaporación, vientos y radiación solar) no sería rentable, sobre todo depósitos salinos con salmueras de concentraciones inferiores a 500 ppm. Por eso el Salar de Atacama reúne las condiciones para desarrollar este tipo de proceso, donde sus salmueras presentan concentraciones en litio de 2.100 ppm, en un área con bajas tasas de precipitación, con alta tasa de evaporación (3.200 mm/año) y con una duración de entre 12 y 14 meses.

El caso de la cadena de valor aguas abajo, donde todavía no hay capacidades productivas operando, representa un desafío mayor en cuanto a la transferencia y desarrollo de tecnologías. Sin embargo, existen señales auspiciosas en términos de inversiones anunciadas, en el caso de Chile, para producción de material catódico y componentes de celdas, y además ensamblaje de baterías estacionarias para respaldo de energías renovables no convencionales.

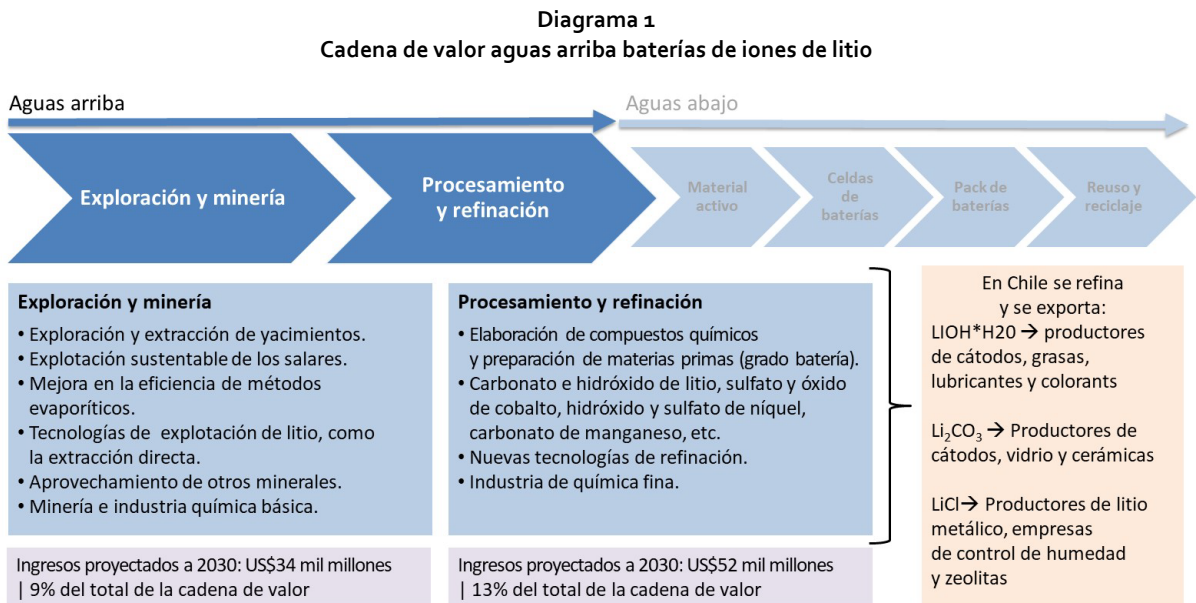
La integración de políticas públicas y prácticas sustentables en todas las cadenas de valor en torno al litio debe ser la columna vertebral de la estrategia y, de esta forma, generar beneficios económicos, ambientales y sociales a largo plazo para todas las partes interesadas de la industria. Es por ello que cualquier arreglo de cooperación regional debe considerar la colaboración entre actores claves, es decir, las empresas, gobiernos, instituciones académicas y organizaciones de la sociedad civil. En términos de capacidades tecnológicas, entre los actores entrevistados para este estudio (véase el anexo), se identifica que Chile está avanzando en investigación y desarrollo en salares y sus ecosistemas, y Argentina está más orientada a desarrollar capacidades en tecnologías de batería.

En cualquier estrategia de mayor valor agregado aguas abajo, es necesario considerar el rol gravitante de China, dada su alta participación en los diferentes eslabones de la cadena de valor. En las etapas aguas arriba, y aunque China representa solo el 13% de la producción mundial de litio, es responsable por más de 50% de todo el procesamiento de litio. El país asiático domina el refinado y procesamiento de minerales de grado batería, y cerca del 80 % de la producción mundial de grafito. Por otro lado, en las etapas aguas abajo de la cadena de valor de las baterías de iones de litio y vehículos eléctricos, la participación de China es aún más significativa, ya que representa cerca del 70% de toda la producción de cátodos y más del 80% de los ánodos. Además, China contribuye con la producción de 75% de las celdas de baterías y más de la mitad de todos los vehículos eléctricos (IEA 2022).

Sin embargo, también hay que tener presente que se espera una reorganización de la industria con una pronta desaparición del oligopolio de extracción, procesamiento y refinamiento del litio con nuevos entrantes, como es el caso de Australia que podría llegar al 20% del mercado de refinación al 2027, y una expansión en la producción de baterías por parte de Estados Unidos, Europa, Corea del Sur y Japón. Por otra parte, las empresas de Asia, Europa y Norteamérica tienen como prioridad la seguridad del suministro y así responder a las demandas de proveedores y fabricantes de vehículos eléctricos, por lo que han estado disponibles para establecer alianzas estratégicas y participar en empresas conjuntas.

B. Las posibilidades en la cadena de valor aguas arriba: exploración, extracción y producción de litio refinado

Una breve descripción de la cadena de valor aguas arriba —exploración, extracción y producción primaria— se presenta en el diagrama 1. La exploración implica identificar y evaluar yacimientos viables, donde se extrae el litio de fuentes naturales como salmueras y, posteriormente, la salmuera se concentra. En esta etapa se incluyen, principalmente, procesos de minería, geohidrología, procesamiento químico para concentrar la salmuera en litio y su tecnología de extracción.



Fuente: Elaboración propia. Datos de ingresos globales proyectados a 2030 de McKinsey & Company & Global Battery Alliance, 2023.

En el caso de procesamiento y refinación, la salmuera extraída y concentrada, en el caso de Chile, se envía a procesos de purificación y refinación para obtener productos químicos de alta pureza, como carbonato de litio, hidróxido de litio o cloruro de litio. En esta etapa, se agrega valor mediante la obtención de productos con especificaciones precisas en las diferentes aplicaciones. Las capacidades incluyen técnicas de purificación química y procesos de cristalización. Tanto el carbonato de litio, el hidróxido de litio y el cloruro de litio son enviados a los mercados internacionales para posteriormente ser convertidos a litio metálico, o butil-litio y otros derivados orgánicos e inorgánicos. De manera similar en Argentina, el cloruro de litio se puede producir directamente a partir de las salmueras (Salar del Hombre Muerto). El mercado de consumo final es altamente diferenciado y establece requerimientos técnicos de alta sofisticación.

En la cadena aguas arriba las posibilidades de valor agregado están, en primer lugar, en la investigación y desarrollo asociado a la exploración y explotación de litio, innovando en las metodologías de identificación de reservas y recursos de minerales en salares, establecimiento de estándares de protección del medio ambiente y la aplicación de nuevas tecnologías que permitan una exploración amigable con el ecosistema. Uno de factores que han limitado responder con mayor rapidez a la mayor demanda mundial de litio es la complejidad que presentan los salares, al ser ecosistemas únicos, dinámicos y frágiles. Hay desconocimiento científico de la geohidrología del salar y el subsuelo, las condiciones climáticas, entre otros. A esto se suma la conflictividad con las comunidades por el acceso y uso de los recursos e impactos de la actividad. Se trata entonces de desarrollar ciencia de salares, considerando que cada uno de ellos es un ecosistema único, dinámico y vivo¹⁰.

En esta línea cabe destacar el trabajo que el Ministerio de Ciencia de Chile está realizando para diseñar el futuro Instituto Tecnológico y de Investigación en Litio y Salares. En el intertanto, se han focalizado instrumentos de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) para financiar líneas de investigación definidas como prioritarias en un proceso de diálogo entre la comunidad científica, y los ministerios de Ciencia, Minería y Medio Ambiente. Las áreas identificadas son ingeniería y geología en litio y salares, ecología y biodiversidad en salares y su conexión con la producción del litio, desarrollo social, cultural y territorial de la industria del litio y los salares. Estas investigaciones permitirán avanzar en temas tan diversos como los nuevos métodos de extracción de salmuera y obtención de litio, usos especiales en baterías diferentes a los tradicionales, recuperación y reutilización de materiales asociados a la cadena de valor del litio, hasta biodiversidad asociada a los salares, modelamiento del impacto de los procesos de explotación de salares, monitoreo eficiente de los ecosistemas, pasando por conflictos sociales y ambientales en las diferentes cuencas, relación entre la minería del litio y el desarrollo territorial o el balance entre tecnologías emergentes y sus posibles efectos e impactos socio-ambientales¹¹.

Por otra parte, las empresas productoras de litio también juegan un rol fundamental en la agregación de valor al innovar en procesos y establecer estrategias de diversificación productiva, destacándose los casos de empresas que operan en Argentina y Chile. Argentina es uno de los pocos lugares en el mundo donde se está actualmente implementando procesos operacionales de extracción directa de litio (EDL). La empresa Livent en la provincia de Salta, Argentina, a partir del desarrollo de

¹⁰ En Argentina, a diciembre de 2023, hay tres plantas de litio en operación en Jujuy y Catamarca y cerca de 50 proyectos de exploración, distribuidos en ambas provincias, así como en Salta. Se prevé la entrada en producción de cinco nuevos proyectos de litio en las tres provincias en los próximos años. Estos proyectos, liderados por empresas internacionales como Ganfeng Lithium, Eramet, POSCO, Allkem Lda y Zijin Mining Group, contribuirán significativamente al aumento de la capacidad productiva del país. Sumados a las expansiones en las plantas existentes, se estima que Argentina alcanzará una producción anual de carbonato de litio equivalente de más de 200.000 toneladas.

¹¹ Véase noticia del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile, 21 de noviembre de 2023, <https://www.minciencia.gob.cl/noticias/gobierno-destinara-6-mil-millones-de-pesos-para-investigacion-de-litio-y-salares/>, último acceso en febrero de 2024.

una planta piloto diseñada por Tecpetrol, está extrayendo selectivamente litio de mezclas salinas mediante membranas o filtros. Estimaciones optimistas prevén que estas nuevas tecnologías podrían estar disponibles a escala industrial en el periodo 2025-2030.

En el caso de Chile, existen iniciativas en las empresas SQM, Albemarle y Clean Tech Lithium. En el caso de SQM se destaca el desarrollo de nuevas tecnologías para avanzar en la elaboración de productos químicos cada vez más refinados, de alta pureza, con un tratamiento sostenible. En complemento de ello, está la evaluación voluntaria al Índice de Sustentabilidad Dow Jones, posicionándose dentro del primer quintil de la industria química mundial y, también, su compromiso para transitar al carbono neutralidad, mejorando y fortaleciendo la eficiencia energética en el transporte de carga por carretera, para disminuir el consumo de combustibles contaminantes y emisiones de CO₂ (SQM 2022). En Albemarle, existe el Laboratorio de la Planta Química La Negra enfocado principalmente a dar soporte al proyecto *Get Right* y al proyecto expansión (Planta III), dando respuesta a los requerimientos analíticos claves, que permitirán optimizar tanto la operación actual como el diseño de las futuras instalaciones. También, destaca el proyecto de investigación y desarrollo en el Salar de Atacama y con la Universidad de Antofagasta a través del Centro de Investigación Avanzada de Litio y Minerales Industriales (Celimin) y el Centro de Desarrollo Energético (CDEA)¹². La empresa CleanTech Lithium, en colaboración con Sunresin, es la que más ha avanzado en extracción directa en Laguna Verde, y se prevé que entre en producción en el año 2025, utilizando energía geotérmica que es altamente eficiente para producir calor para el proceso EDL.

C. Las posibilidades en la cadena de valor aguas abajo: fabricación de baterías de iones de litio

La cadena de valor aguas abajo se presenta en el diagrama 2. En primer lugar, destaca la producción de materiales activos, de alta sofisticación tecnológica, que concentra la mayor proporción del valor agregado en la cadena, aportando cerca del 40% del valor. Una batería se compone por el cátodo, ánodo, electrolito y separador con compuestos de litio. La industria avanzada de iones de litio se analiza en términos de innovación de cátodos, ánodos y electrolitos, sin mencionar otros componentes clave como aglutinantes de electrodos, colectores de corriente, aditivos y agentes conductores.

En el caso de la producción de celdas de baterías, el litio se convierte en cátodos y ánodos para baterías recargables de iones de litio. Las celdas se ensamblan a partir de cátodos, ánodos, electrolitos y separadores, que contienen compuestos de litio, para ser puestas en vehículos eléctricos, o dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía. Aquí se agrega el valor a través de la integración de tecnologías de fabricación avanzadas y la optimización de la eficiencia de las baterías. Esta parte de la cadena abre muchas alternativas de desarrollo, aunque de una muy alta especialización.

El ensamblaje de pack de baterías corresponde a un paquete de múltiples celdas que componen un módulo de baterías y a ciertos módulos que la forman, según el diseño requerido para su aplicación final. En este proceso se incorpora el control térmico y cargas eléctricas, componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, asegurando la protección contra golpes e incorporando el software (BMS) que administra el pack. Las baterías se transforman en una variedad de productos finales, según sea el rubro de aplicación como vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos portátiles y sistemas de almacenamiento de energía residencial o industrial. Agregar valor en esta etapa involucra la integración del litio en los distintos productos considerando el diseño, la ingeniería y los métodos de fabricación específicos para cada aplicación.

¹² Las empresas productoras de litio en Chile cuentan con distintas iniciativas de investigación y desarrollo, por ejemplo, desde Albemarle se destacan sus centros de investigación en la página [https://www.albemarlelitio.cl/products/investigaci%C3%B3n-y-desarrollo-\(i+d\)](https://www.albemarlelitio.cl/products/investigaci%C3%B3n-y-desarrollo-(i+d)), último acceso febrero 2024.

Diagrama 2
Cadena de valor aguas abajo de baterías de iones de litio



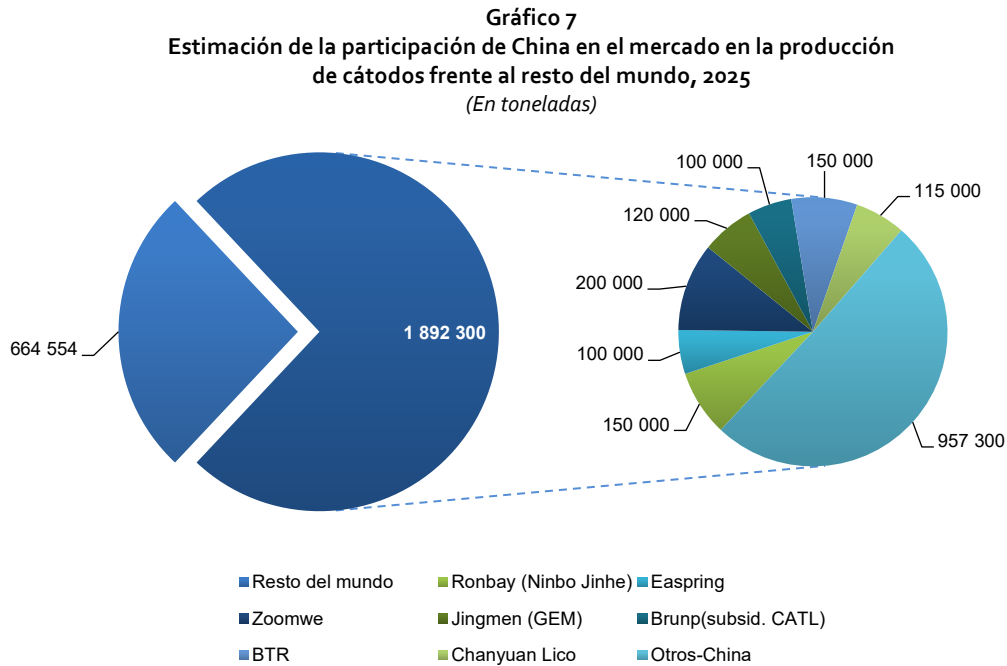
Fuente: Elaboración propia. Datos de ingresos globales proyectados a 2030 de McKinsey & Company & Global Battery Alliance, 2023.

El reciclaje corresponde a aquel proceso para disponer los productos cuando lleguen al final de su vida útil y así el litio contenido en las baterías puede ser reciclado y reutilizado en nuevos productos. Esta etapa agrega valor a través de la recuperación de materiales valiosos y la reducción del impacto ambiental. Las capacidades incluyen tecnologías de reciclaje de baterías y la gestión sostenible de residuos. La construcción de plantas de reciclaje de baterías de litio ha aumentado a un ritmo acelerado, destacando que a fines del 2022 ya existían alrededor de 44 empresas en Canadá y Estados Unidos y 47 en Europa, como resultado de una alianza entre las empresas automovilísticas y los recicladores de baterías (USGS, 2023).

Las capacidades disponibles en esta cadena están fuera de la región con excepciones puntuales. Sin embargo, se espera una mayor movilidad de estas capacidades productivas desde Asia como consecuencia de las recientes políticas industriales verdes de Estados Unidos y Europa y que fueron descritas en el capítulo II. En particular, incorporando a Brasil para configurar un mercado regional, es posible promover y desarrollar proyectos internacionales asociados al desarrollo de materiales de batería avanzados, ingeniería de procesos de fabricación, investigación en almacenamiento de energía, diseño de productos y sistemas de reciclaje.

En este caso, hay que desarrollar capacidades de producción de material activo, que son los componentes de la batería. Por lo tanto, se requiere desarrollar también nuevos insumos con sostenibilidad y responsabilidad ambiental y social. Para fabricar los componentes de las celdas de baterías de iones de litio se necesitan otros minerales como níquel (Ni), cobalto (Co), manganeso (Mn), aluminio (Al), cobre (Cu), silicio (Si), estaño (Sn), titanio (Ti) y carbono (C) en formas de grafito natural o sintético. Si observamos el diagrama 2, se tiene que es importante no sólo el desarrollo de insumos actuales, sino también analizar alternativas nuevas, con otras tecnologías que el mercado esté estudiando.

Desde el punto de vista de las políticas de atracción de inversiones extranjeras, un primer segmento de empresas de interés está conformado por los productores de materiales catódicos. Como se observa en el gráfico 7, la confección de cátodos es liderada por China y luego le siguen Japón, República de Corea, Estados Unidos y Europa.



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

Para identificar oportunidades en el ámbito de la producción de baterías de iones de litio, hay que considerar sus distintos tipos a partir de la combinación del litio con otros minerales para la confección del cátodo (cobalto, manganeso, fósforo, hierro, níquel, aluminio). Cada tipo de baterías de iones de litio tienen ventajas y desventajas. Por ejemplo, la batería de fosfato de litio y hierro-LFP, es una de las baterías consideradas más seguras, pero son más pesadas porque su energía específica es más baja (90-140 Wh/kg). Las baterías de tipo LFP ofrecen estabilidad térmica gracias a que pueden soportar altas temperaturas, sus materiales son menos tóxicos, tiene mayor durabilidad (hasta 2000 ciclos) y su costo es menor, debido a que el hierro es un mineral abundante, y no contienen cobalto y tampoco níquel.

Los mercados finales de Europa y Estados Unidos pueden convertirse en fuentes probables de nuevas inversiones extranjeras para la producción regional de cátodos y precursores. Avanzar en la cadena requiere de condiciones más exigentes como es el abastecimiento de otros materiales críticos. Si bien la región no es un productor de níquel clase 1, cobalto o manganeso, en Brasil existirían condiciones para abrir la mina Tocantins de níquel y cobalto (cerrada en 2016 por bajos precios) y reactivar la producción de su refinera de Sao Miguel en Sao Paulo. Ello podría ser un avance para ir generando las condiciones para viabilizar en la región una capacidad de producción de baterías para vehículos eléctricos o para almacenamiento energético.

Un avance promisorio en la estrategia de agregación de valor aguas abajo en la región son los recientes anuncios de dos inversiones de empresas chinas, BYD y Yongqing Technology Co, de instalar plantas de producción de material catódico en Chile por un monto aproximado a los 500 millones de dólares en el marco de las licitaciones para cuotas de carbonato de litio a precios preferentes para iniciativas de agregación de valor, como parte de los contratos de Albemarle y SQM con la CORFO. Por un lado, la empresa BYD anunció un proyecto de instalación de una fábrica para producir hasta 50.000 toneladas al año de material catódico del tipo fosfato de hierro y litio (LiFePO_4 para baterías de tipo LFP), con inversiones estimadas de US\$ 290 millones, para entrar en operación hacia fines del año 2025 y estima generar 500 empleos¹³. Por otro lado, Yongqing Technology Co proyecta para el año 2025 la entrada en operación de una planta también de material catódico de fosfato de hierro y litio con una capacidad de 120.000 toneladas anuales, un monto de inversión estimado de USD 233 millones y un total de 668 empleos. En sus esfuerzos de expansión por América Latina, BYD también ha anunciado la construcción de tres nuevas fábricas en Brasil, incluyendo una planta del mismo material catódico y su primera fábrica de autos eléctricos fuera de Asia, con una inversión estimada de cerca de US\$ 620 millones y capacidad de 150.000 autos por año¹⁴.

Por su parte, las empresas chilenas productoras de litio también exploran alianzas estratégicas para agregar valor en los segmentos aguas abajo. Ejemplo de ello es el acuerdo suscrito entre SQM y LG Energy Solution, empresa líder en la producción de baterías, para fortalecer sus relaciones de negocio y desarrollar proyectos de inversión conjunta en distintas etapas de la cadena de valor de la industria de la electromovilidad. Este convenio complementa el acuerdo de suministro de litio ya vigente entre ambas partes. Entre los potenciales proyectos de inversión conjunta se encuentran la producción de cátodos e hidróxido de litio además de proyectos de reciclaje.

En el ámbito de las instituciones de investigación de la región, es esencial una cooperación regional tecnológica y de formación de recursos humanos, para mejorar la eficiencia y capacidad de almacenamiento de energía en baterías fijas, considerando la alta demanda de almacenamiento de las energías renovables. Otro ámbito de transferencia y desarrollo tecnológico se refiere a la creciente infraestructura de carga que se requiere para acelerar la penetración de los vehículos eléctricos en los países de la región.

Un ejemplo notable de esfuerzo tecnológico es el de Argentina, con el establecimiento de primera planta de desarrollo tecnológico de celdas y baterías de litio en la región, por iniciativa de la empresa de tecnología Y-TEC, conformada por YPF y el CONICET. Esta planta permitirá la fabricación de celdas y baterías de iones de litio, desarrollando otros materiales activos generados en Argentina como el grafito y el aluminio, y pensada tanto para almacenamiento de energía como para electromovilidad. En colaboración, además, con la Universidad Nacional de La Plata esta planta tendrá una capacidad de producción anual de 15 MWh, equivalente a 2.000 baterías para almacenamiento de energías renovables o aproximadamente 300 baterías para vehículos eléctricos.

¹³ Ver anuncio de la Corfo en https://www.corfo.cl/sites/Satellite?c=C_NoticiaNacional&cid=1476735036931&d=Touch&pagename=CorfoPortalPublico%2FC_NoticiaNacional%2FCorfoDetalleNoticiaNacionalWeb.

¹⁴ Anuncio de BYD, el 4 de julio de 2023 <https://www.byd.com.br/marco-na-historia-dos-carros-no-brasil-byd-chega-a-bahia/>.

IV. Propuestas de políticas de desarrollo de capacidades y cooperación regional

A. Enfoque de políticas y áreas de cooperación para el desarrollo de la industria del litio en Chile y América del Sur

Como se dijo en los capítulos anteriores, la industria del litio ha crecido mucho en las últimas décadas por su importancia en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos, de almacenamiento para energías renovables y dispositivos electrónicos. Este recurso se ha convertido en un elemento fundamental para la transición hacia una economía más limpia y sostenible. Su extracción y procesamiento están muy concentrados en algunas regiones del mundo, lo que plantea desafíos y oportunidades para desarrollar capacidades y cooperación regional.

En este contexto, se hace necesario explorar y proponer políticas de desarrollo de capacidades y cooperación regional que promuevan un uso sostenible y equitativo del litio. Estas políticas deben abordar diversos aspectos, como la explotación responsable de los recursos naturales, la promoción de la tecnología y la innovación en la cadena de valor del litio, la creación de empleos y el desarrollo de los territorios y comunidades locales.

Para este efecto, en este capítulo, abordamos propuestas de políticas de desarrollo de capacidades y cooperación regional para la industria del litio, considerando tanto los desafíos como las oportunidades que presenta esta industria. Exploramos enfoques que fomentan la colaboración entre países productores regionales de litio, así como estrategias para garantizar que los beneficios económicos y ambientales de la industria se compartan de manera justa y sostenible. Además, examinamos las medidas que pueden impulsar la investigación, el desarrollo tecnológico y la formación de recursos humanos en este campo, para promover un futuro más prometedor para la industria del litio regional y global.

La colaboración entre actores clave en la cadena de valor del litio, incluidas empresas, gobiernos, instituciones académicas y organizaciones de la sociedad civil, es fundamental para abordar los desafíos y aprovechar las oportunidades en el sector del litio de manera competitiva y sostenible. El diseño de las políticas debe tener en consideración un conjunto de factores de contexto de distinto índole, destacando la necesidad de poner en valor las reservas y la producción regional, privilegiar un enfoque balanceado de la geopolítica de la industria, reconocer la alta complejidad tecnológica de las cadenas de valor y la necesidad de configurar en mercado de electromovilidad regional.

A partir del valor estratégico de las reservas y la producción competitiva de litio de la región y, principalmente, de las nuevas estrategias corporativas y alianzas internacionales entre las diversas empresas del ecosistema de explotación y manufactura, es posible establecer nuevos modelos de negocios y alianzas de inversión para la transferencia tecnológica, nuevas capacidades productivas y avanzar en la agregación de valor. Por otra parte, para avanzar hacia un desarrollo de la cadena de valor con capacidades tecnológicas y productivas regionales, se requiere tener mecanismos pragmáticos de cooperación público-privada y que, entre otros aspectos, la región adhiera a un enfoque de autonomía estratégica frente a la creciente competencia geopolítica entre los tres principales bloques económicos, esto es Norteamérica, Unión Europea y China. También se requiere, no solo una mirada integral sobre la cadena de valor del litio y la electromovilidad, sino que, simultáneamente, una mirada propia a cada segmento con su organización industrial, estado tecnológico y lógica de funcionamiento. Por último, cualquier iniciativa de cooperación debe tener entre sus pilares el mercado regional de electromovilidad, el cual se ha beneficiado del desarrollo de energías renovables en el sistema eléctrico, la creciente demanda de buses eléctricos en la flota de transporte público y una recuperación de las capacidades productivas en buses eléctricos, principalmente en Brasil.

Desde diversas consideraciones políticas, se proponen agendas de cooperación, distinguiendo las iniciativas para cada uno de los dos clústeres identificados. En el cuadro 9, para el clúster de exploración y explotación de litio refinado (cadena de valor aguas arriba), se presentan las principales consideraciones de políticas en los ámbitos de la producción, sustentabilidad y escenarios de crisis, de donde se desprenden iniciativas de cooperación para abordar la explotación de salares sustentable, la sostenibilidad ambiental a través del desarrollo de la geohidrología de salares y las tecnologías de extracción directa, y el desarrollo de proveedores de bienes y servicios de ingeniería, entre otros.

Cuadro 9
Enfoque de políticas para el desarrollo sostenible de los salares y áreas de cooperación regional

	Función de producción	Sustentabilidad	Episodios de crisis
Enfoque de política	La función de producción es específica al salar. Las instituciones y la ecología de la localización son relevantes. Entender la función de producción requiere I&D en la localidad específica.	La acción colectiva y la regulación estatal cuenta sobre el manejo del recurso y su sustentabilidad. La capacidad de carga del recurso difiere entre localizaciones.	El recurso natural sufre mutaciones a través del tiempo. Existe tendencia a la sobreexplotación por lo que es necesario anticipar con investigación científica.
Áreas de cooperación	Ecología y biodiversidad en salares. Geohidrología de salares. Ingeniería y geología en litio y salares. Desarrollo de proveedores de bienes y servicios de ingeniería.	Institucionalidad para la regulación de salares. Nuevos métodos de extracción de salmuera. Monitoreo eficiente e integrado de los ecosistemas y protección de salares.	Desarrollo social, cultural y territorial de la industria. Modelamiento del impacto de los procesos de explotación de salares. Información de proyectos y su impacto.

Fuente: Elaboración propia basada en políticas de Katz (2019).

El segundo clúster corresponde a la cadena de valor de la fabricación de baterías de iones de litio (cadena de valor aguas abajo), y se orienta al desarrollo de nuevas actividades de fabricación con un alto nivel tecnológico tales como componentes de las celdas (ánodo, cátodo, electrolito y separadores), celdas y baterías para fines específicos. En este caso los instrumentos de política son aquellos orientados a atraer o crear empresas en nuevas industrias tecnológicas, tal como se muestra en el cuadro 10.

Cuadro 10
Enfoque de políticas para cadena de valor de la fabricación de baterías de iones de litio y áreas de cooperación regional

	Instalación de nuevas industrias	Creación de empresas	Desarrollo de capacidades
Enfoque de políticas	Atracción de inversiones estratégicas en la cadena de valor.	Institucionalidad e instrumentos para el emprendimiento.	Programas estratégicos de especialización y transferencia tecnológica.
Áreas de cooperación	Mercado regional de electromovilidad. Promoción de un clúster regional de la industria del litio. Usos de cuotas para proyectos de industrialización.	Garantías, capital semilla y de riesgo. Redes, territorio e incubadoras. Redes de inversionistas ángeles. Desarrollo de proveedores.	Institutos tecnológicos y red universitaria. Plantas pilotos de baterías diferentes a los tradicionales. Recuperación de materiales de litio. Formación y movilidad de investigadores.

Fuente: Elaboración propia.

Para establecer una plataforma inicial de cooperación regional en la industria del litio, es necesario partir de la institucionalidad y de los instrumentos de desarrollo productivo sostenible que existen en cada uno de los países, de manera de avanzar y converger a partir de las mejores prácticas. Una primera aproximación del estado de situación de la institucionalidad y de los principales instrumentos para la ciencia, tecnología e innovación tecnológica se presenta en el cuadro 11.

Cuadro 11
Instrumentos de financiamiento en ciencia, tecnología e innovación

	Financiamiento de la investigación y desarrollo (I+D)	Financiamiento a la formación de personas	Financiamiento de apoyo a la innovación empresarial
Coordinación y convergencia entre instrumentos de financiamiento	Fondos de investigación científica y tecnológica. Incentivos a la investigación científica y tecnológica. Fondos equipamiento e infraestructura. Fondos para clústeres, polos tecnológicos e incubadoras de empresas.	Becas de estudios de grado, posgrado y posdoctorado. Programas de creación y apoyo a posgrado. Programas de movilidad universitaria.	Fondos de innovación y competitividad. Crédito tributario a la I+D. Créditos para el escalamiento de proyectos de innovación. Programas de capacitación técnica.

Fuente: Elaborado sobre la base de CEPAL (2022b).

La posibilidad de articular políticas regionales de ciencia, tecnología e innovación para avanzar en la explotación sustentable y la diversificación productiva del litio pasa primeramente por coordinar instrumentos de política existentes en los países. Dentro de este espíritu se enmarca el Acuerdo de Cooperación, firmado por las Cancillerías de Argentina y Chile, para promover la sostenibilidad ambiental, económica y social, la formación y capacitación de recursos humanos y la agregación de valor. En este caso, se constituyó un Grupo de Trabajo Binacional de Litio y Salares, que entre sus objetivos destaca el intercambio de conocimientos entre equipos científicos y técnicos y la capacitación de recursos humanos.

Recuadro 4**El rol de las empresas públicas y los Centros Tecnológicos Nacionales**

Las empresas públicas y los centros tecnológicos, en asociación con empresas privadas, cumplen un importante rol en la creación de capacidades nacionales en la exploración, explotación y desarrollo de la cadena de valor de litio, más aún en un contexto internacional donde, por factores geopolíticos, se está regulando la movilidad de la inversión extranjera directa, el acceso y la transferencia tecnológica en la industria de la electromovilidad. Pueden ser actores claves para el desarrollo sostenible y competitivo de la industria del litio, por su capacidad para facilitar la exploración y producción, e impulsar la investigación y la innovación. Entre sus contribuciones destacan:

- **Investigación y Desarrollo Tecnológico:** las empresas públicas y los Centros Tecnológicos Nacionales, en alianzas con empresas privadas, tienen la capacidad de llevar a cabo investigaciones de vanguardia en el campo de la extracción, procesamiento y aplicación del litio. Pueden desarrollar nuevas tecnologías y métodos más eficientes y sostenibles para la obtención y el tratamiento del litio. Estos avances pueden reducir los costos de producción y minimizar el impacto ambiental.
- **Transferencia de Tecnología:** pueden actuar como catalizadores para transferir tecnología y conocimiento a la industria privada. Esto puede acelerar la adopción de mejores prácticas y tecnologías más avanzadas en la cadena de valor del litio.
- **Capacitación y Formación:** pueden ofrecer programas de capacitación y formación especializados para trabajadores de la industria del litio. Esto es esencial para desarrollar una fuerza laboral altamente calificada y especializada, lo que a su vez contribuye a la competitividad y sostenibilidad a largo plazo de la industria.
- **Desarrollo de Normativas y Estándares:** pueden colaborar en el establecimiento de normativas y estándares de calidad y sostenibilidad para la industria del litio. Esto asegura que las prácticas de extracción, procesamiento y reciclaje cumplan con los más altos estándares ambientales y de seguridad.
- **Cooperación Internacional:** pueden promover la cooperación y colaboración internacional en investigación y desarrollo relacionados con el litio. Esto puede incluir alianzas con otros países productores y consumidores de litio para compartir conocimientos y recursos.
- **Inversión Estratégica:** las empresas públicas pueden jugar un papel importante en la inversión estratégica en la industria del litio. Esto puede incluir la participación en proyectos de exploración y producción, así como la inversión en infraestructura de procesamiento y transporte.
- **Promoción de la Sostenibilidad:** tienen la capacidad de liderar iniciativas de sostenibilidad en la industria del litio, asegurando prácticas responsables en términos ambientales y sociales. Esto es fundamental para mantener la aceptación pública y minimizar el impacto negativo en las comunidades locales.

Fuente: Elaboración propia.

B. Propuesta para una agenda regional de cooperación en el triángulo del litio

En los últimos años se han realizado diversos esfuerzos por parte de los países para desarrollar una agenda regional de cooperación en torno al litio, promoviendo un diálogo político y técnico con el objetivo de avanzar hacia un esquema de integración regional. El estado de situación de la agenda en relación con los avances, oportunidades y obstáculos es la siguiente:

Avances y logros:

- **Diálogo político:** se han establecido mecanismos de diálogo político entre los tres países para abordar temas relacionados con el litio. Esto ha sentado las bases para la cooperación y ha contribuido a la generación de un entendimiento mutuo.
- **Acuerdos bilaterales:** Argentina, Bolivia y Chile han firmado acuerdos bilaterales para promover la cooperación en la exploración, extracción, procesamiento y comercialización del litio. Estos acuerdos sientan las bases para una mayor colaboración.

- Investigación conjunta: aunque existen algunos proyectos de investigación conjunta en áreas como la tecnología de extracción, procesamiento y almacenamiento de litio, aún son incipientes. También se destaca el Foro Permanente de Diálogo Técnico sobre Innovación, Desarrollo Tecnológico y Agregación de Valor al Litio, coordinado por la CEPAL para incentivar el intercambio y cooperación regional, y que congrega a representantes de entidades gubernamentales o mixtas involucradas con la actividad litífera de Argentina, Bolivia, Chile y México.

En este ámbito, además del fortalecimiento de capacidades nacionales en investigación y desarrollo, se requiere también abordar desafíos comunes en el marco de las políticas de desarrollo de los países. Estos esfuerzos deben incentivarse para contribuir con el desarrollo del conocimiento compartido.

Oportunidades:

- Economías de escala: la cooperación regional podría permitir la creación de economías de escala en la producción de litio, lo que podría reducir los costos de producción y aumentar la competitividad en el mercado global a partir de un clúster regional de extracción y producción de litio. Ejemplo de ello ha sido la reciente decisión de empresas de producción de material catódico de instalarse en Chile y abastecerse también de la producción de Argentina.
- Desarrollo de la cadena de valor: la colaboración en toda la cadena de valor del litio, desde la exploración hasta la fabricación de baterías, podría crear oportunidades para el desarrollo de eslabonamientos industriales y tecnológicos en la región a través del desarrollo de proveedores de insumos, bienes y servicios de ingeniería.
- Atracción de inversiones: una agenda de cooperación regional sólida podría ser más atractiva para las inversiones extranjeras, lo que podría acelerar el desarrollo de proyectos de litio en la región, focalizada en China, Japón y República de Corea.

Obstáculos:

- Diferencias en los marcos regulatorios: aunque las diferencias regulatorias entre los países pueden dificultar la cooperación y convergencia, es posible encontrar un común denominador para el desarrollo de la industria en los ámbitos del desarrollo sostenible de los salares y la incorporación de valor agregado.
- Desafíos técnicos: aunque ha habido avances, todavía existen muchos desafíos técnicos en la producción de litio, y abordarlos requiere de inversiones significativas en investigación y desarrollo y, particularmente, el involucramiento de inversionistas internacionales.
- Aspectos ambientales y sociales: la explotación del litio está asociada a impactos ambientales y sociales significativos. La cooperación regional debe abordar de manera efectiva estos desafíos para garantizar prácticas justas y sostenibles.

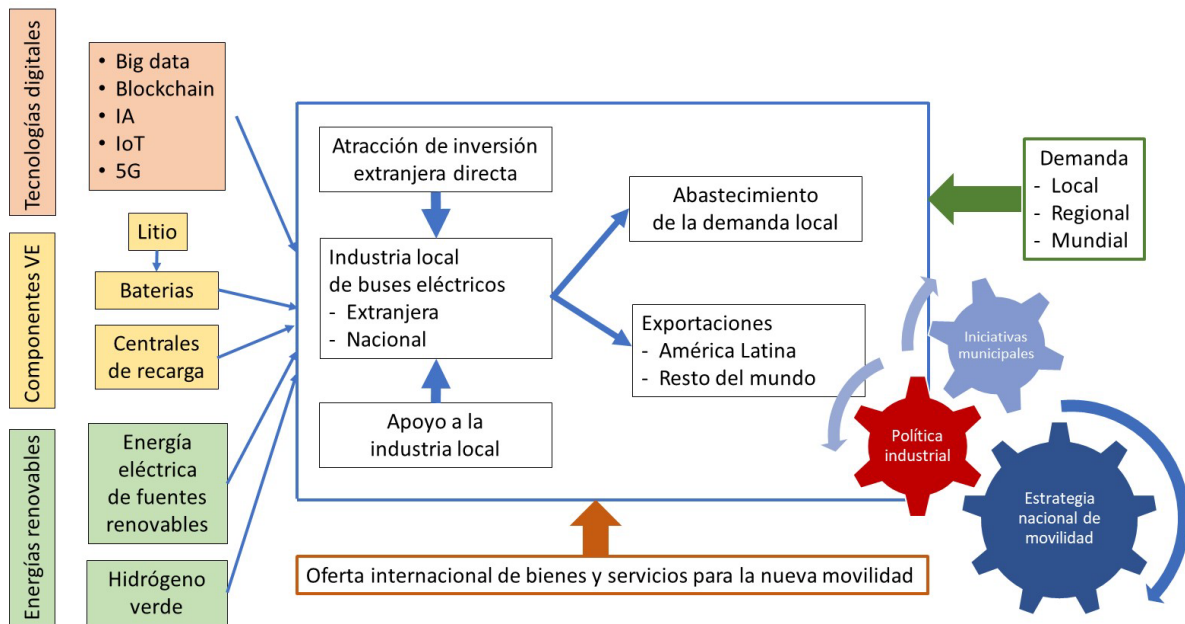
Sin desconocer los avances de las políticas sobre el litio y la agenda regional, especialmente con el trabajo del Foro Técnico coordinado por CEPAL, se sostiene que el próximo paso es avanzar en una estrategia que integre la cadena de valor del litio con el mercado regional de electromovilidad. Es necesario ir más allá del conjunto de iniciativas relativas a las estrategias productivas, tecnológicas y de inversiones que han definido cada uno de los países.

El conjunto de instrumentos en la región de políticas de apoyo a la ciencia, la tecnología y la innovación en litio está en una fase incipiente y se requiere generar un gran impulso en este ámbito. En el periodo reciente, el uso extendido y tradicional de fondos concursables orientados por la demanda ha traído como consecuencia una gran dispersión de proyectos con bajos recursos, con visión de corto plazo y áreas temáticas insuficientemente abordadas. Por ejemplo, en el caso de salares y litio, han sido escasas hasta ahora actividades de investigación desarrolladas por las universidades.

Se propone una estrategia regional de la cadena de valor del litio en el contexto de un mercado regional de electromovilidad, que aproveche las oportunidades de los cambios disruptivos en este nuevo ciclo tecnológico y se oriente a construir capacidades productivas y tecnológicas. En este caso se trata, en primera instancia, de identificar y alinear instituciones y combinar un conjunto inicial de instrumentos de política pública para generar una estrategia y trayectoria convergente de los múltiples y diferentes actores, sectores e inversiones involucradas. Este conjunto de políticas debe ser de naturaleza colaborativa y basado en la competencia, y favorecer el desarrollo de nuevos sectores y cadenas productivas y de servicios.

Una visión del ecosistema industrial de la electromovilidad regional, que incorpora la cadena de valor de la industria del litio, se presenta en el diagrama 3. Para abordar la cadena de valor del litio y la electromovilidad, se requiere una visión de conjunto entre los sectores de extracción minera, procesamiento químico, energía y manufacturero. Los nuevos modelos de movilidad y transporte eléctrico, como la producción de energía abastecida por fuentes renovables tienen que estar en conexión con la fabricación regional de insumos, partes, componentes y equipos asociados a la cadena de valor del litio.

Diagrama 3
Ecosistema industrial de la electromovilidad regional



Fuente: CEPAL, presentación de Álvaro Calderón, en reunión del proyecto Ciudades inclusivas, sostenibles e inteligentes, 2021.

La expresión de esta política a nivel regional sería a través de un Plan Regional para la cadena de valor en torno al litio. Estos lineamientos y propuestas son un llamado a la acción y establece una agenda concreta, que exigen una mayor cooperación de múltiples partes interesadas fortaleciendo mecanismos regionales de integración. Se propone un plan regional de carácter estratégico donde se incorporen las principales líneas de acción para acelerar la incorporación de valor agregado del litio en un mercado regional e internacional de la electromovilidad a través de tres líneas de acción, que se descomponen en las siguientes iniciativas:

i) Configurar un ecosistema de explotación sustentable de salares

- Coordinación y convergencia para la exploración y explotación sostenible de salares
 - Fortalecimiento de las agencias regulatorias
 - Participación de las comunidades
 - Técnicas de extracción, productividad e impacto ambiental
 - Red de centros tecnológicos
- Desarrollo de capacidades e infraestructura crítica
 - Capacidades en hidrogeología
 - Capacidades en industria química y refinación
 - Formación de recursos humanos

ii) Desarrollo de capacidades tecnológicas para el diseño y fabricación de baterías de iones de litio para almacenamiento de energía

- Desarrollo de capacidades tecnológicas
 - Tecnologías de baterías (BMS BMU CMU)
 - Arquitectura BESS
 - Electrónica de potencia
 - Formación de recursos humanos
- Fabricación de baterías de almacenamiento de energía (BESS)
 - Ensamble de baterías
 - Fabricación BMS
 - Fabricación de inversores, controladores
 - Software y electrónica de control

iii) Mercado regional de electromovilidad para el transporte público

- Plataforma de buenas prácticas y transferencia tecnológica
 - Infraestructura eléctrica y modos de carga
 - Red de centros tecnológicos e investigación y desarrollo
 - Normas y estandarización
 - Desarrollo de pilotos demostrativos
 - Formación y capacitación
- Mercado regional de electromovilidad agregando demanda de equipos e insumos
 - Mecanismos de compras públicas y licitaciones
 - Facilitación de comercio de electromovilidad
 - Convergencia regulatoria, normas y estándares
 - Líneas de financiamiento regional

- Consorcios regionales para la producción de autobuses eléctricos, insumos y servicios
 - Coordinación de capacidades productivas y tecnológicas
 - Alianzas estratégicas y *joint venture*
 - Atracción de inversiones
 - Desarrollo de proveedores regionales
- Financiamiento para la cadena de valor del litio y la electromovilidad
 - Líneas de financiamiento de la banca de desarrollo nacional, regional y multilateral
 - Mecanismo de garantías para la reconversión industrial.

V. Conclusiones

La gestión estratégica de los recursos de litio se ha vuelto crucial para los países del triángulo del litio en un contexto global de transición hacia fuentes de energía más limpias. Se abre una ventana temporal para que los países productores, a través de una cooperación regional, puedan capitalizar esta oportunidad para diversificar y fortalecer sus economías y promover el desarrollo sostenible.

Son diversos los desafíos que se deben abordar en términos de la competencia global y, principalmente, en la necesidad de establecer estrategias que generen las condiciones para desarrollar conocimiento científico para la explotación sustentable de los salares, así como la transferencia tecnológica y la atracción de inversiones para avanzar en la cadena de valor agregado de la producción de baterías de iones de litio.

La industria está en pleno proceso de reorganización: de aquí al 2030 se prevé la desaparición del oligopolio de extracción, procesamiento y refinamiento del litio con nuevos actores entrantes; si bien seguirá el dominio de China en la producción de baterías, aumentarán los nuevos competidores desde Estados Unidos y Europa; la participación de mercado de vehículos eléctricos chinos disminuirá a medida que la participación de Europa y Estados Unidos comiencen a incrementarse. El escenario más deseable para la región será apostar por una inserción productiva y tecnológica en que se pueda maximizar las posibilidades de desarrollo en los clústeres principales de valor agregado para el litio.

La carrera por el litio ha remodelado la industria de la electromovilidad y las cadenas de suministro globales, con fabricantes, países y empresas compitiendo activamente para asegurar su lugar en un mercado en rápido crecimiento. Este fenómeno tiene el potencial de impulsar la transición hacia una movilidad más sostenible y abrir nuevas oportunidades económicas en el mundo.

La reconfiguración tecnológica internacional ha llevado a la industria automotriz a un punto de inflexión, convirtiéndola nuevamente en una industria de alta tecnología. Esta transformación es el resultado de la convergencia de dos transiciones tecnológicas cruciales, por un lado, la fabricación avanzada digitalizada y, por otra, la transición energética hacia la reducción de emisiones. Esta transformación tiene el potencial de impulsar un futuro más sostenible y limpio para la movilidad global,

pero también plantea desafíos importantes que deben abordarse de manera colaborativa y estratégica para garantizar su éxito a largo plazo. Por tanto, la industrialización del litio requiere de cooperación regional para el desarrollo de capacidades tecnológicas y formación de capital humano altamente especializado. La creación de nuevos centros de investigación con infraestructura avanzada y la formación de expertos es esencial para impulsar el desarrollo sostenible de la industria del litio.

En respuesta a la demanda creciente de baterías por la descarbonización, los países sudamericanos tienen la oportunidad de desarrollar regionalmente actividades como la extracción de minerales, la fabricación de cátodos y el ensamblaje de celdas. Sin embargo, se requiere una estrategia común para impulsar el desarrollo industrial, capturar rentas y agregar valor.

Es necesario articular un conjunto de políticas públicas, que se direccionen tanto a sectores basados en recursos naturales como también a sectores de base tecnológica. Para ello se debe abordar la heterogeneidad institucional de los países del triángulo del litio y construir una plataforma de colaboración regional organizada sobre tres ejes principales: colaboración tecnológica, colaboración productiva y colaboración financiera. La expresión de esta política a nivel regional sería a través de un Plan Regional para las cadenas de valor en torno al litio a través de tres líneas de acción estratégicas: la configuración de un ecosistema de explotación sustentable de salares; el desarrollo de capacidades tecnológicas para el diseño y fabricación de baterías de iones de litio para almacenamiento de energía y; la promoción de un mercado regional de electromovilidad, con prioridad en el transporte público.

Bibliografía

- Agusdinata, DB, Liu, W., Eakin, H. & Romero, H. (2018), Impactos socioambientales de la extracción de minerales de litio: hacia una agenda de investigación. *Reinar. Res. Letón*. 13, 123001.
- Arshad, F., Lin, J., Manurkar, N., Fan, E., Ahmad, A., Maher-un-Nisa Tariq, Feng Wu, F., Chen, R., Li, L. (2022), Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol.180.
- Babidge, S. (2020), La sobrecarga de la consulta: Participación indígena en la industria extractiva en el Salar de Atacama, Chile. *Transformaciones*, 33 48 – 63.
- BloombergNEF (2023), Energy Transition Investment Trends 2023, January.
- Chordia, M., Nordelöf, A. & Ager-Wick Ellingsen, L. (2021), Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 26, pages 2024–2039.
- CEPAL (2023), Informe Especial: Extracción e industrialización del litio: oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe.
- _____(2022a), Hacia la transformación del modelo de desarrollo en América Latina y el Caribe: producción, inclusión y sostenibilidad (LC/SES.39/3-P), Santiago.
- _____(2022b), Ciencia, tecnología e innovación: cooperación, integración y desafíos regionales. NU. CEPAL-CELAC. Edit. CELAC, Santiago, 35 pág.
- COCHILCO (2023), El mercado de litio Desarrollo reciente y proyecciones al 2035. Actualización mayo de 2023. Registro Propiedad Intelectual © N° 2023-A-6119.
- EIU (2023), The global green subsidy race. How is it reshaping climate policy and geopolitics?
- Freytes, C., Obaya, M. & Delbuono, V. (2022), Federalismo y desarrollo de capacidades productivas y tecnológicas en torno al litio, FUNDAR.
- Garcés, I. (2017), LITIO: Industria, recursos y perspectivas chilenas. Número de inscripción: A-278775. Santiago de Chile.
- Gobierno de Chile (2023), Estrategia Nacional del Litio.
- Heinrich-Böll-Stiftung (2020), Litio: los costos sociales y ambientales de la transición energética global, mayo.
- Hensley, R., Laczkowski, K., Möller, T. & Schwedhelm, D. (2022), Can the automotive industry scale fast enough? *McKinsey Quarterly*, May.
- Hocking, M., Kan, J., Young, P., Terry, Ch. & Begleiter, D. (2016), F.I.T.T. for Investors: Welcome to the Lithium-ion Age, Sidney, Deutsche Bank AG. In: <https://www.coursehero.com/file/31468574/4080pdf/>.

- IEA (2023a), *Critical Minerals Market Review 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/critical-minerals-market-review-2023>, Licence: CC BY 4.0.
- _____(2023b), *Critical Minerals Data Explorer*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>.
- _____(2022), *Global Supply Chains of EV Batteries*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>, Licence: CC BY 4.0.
- International Monetary Fund (IMF) (2023), *IMF Country Report No. 23/221 Indonesia*.
- I.E.C. (2020), *Informe económico y comercial. Indonesia. Oficina Económica y Comercial de España en Yakarta*. 53 pp.
- Jiang, S., Zhang, L., Li, F., Hua, H., Liu, X., Yuan, Z. & Wu, H. (2020), Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. *Journal of Environmental Management*. Vol. 262.
- Jiménez, D. & Sáez, M. (2022), *Agregación de valor en la producción de compuestos de litio en la región del triángulo del litio. Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/87)*, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Jones, B., Acuña, F. y Rodríguez, V. (2021), *Cadena de valor del litio: análisis de la cadena global de valor de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos. Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/86)*, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Katz, J. (2019), *Recursos naturales y crecimiento: aspectos macro y microeconómicos, temas regulatorios, derechos ambientales e inclusión social. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/14)*, Santiago, Chile.
- Kelly, J.C., Wang, M., Dai, Q., Winjobi, O. (2021), Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 174, 2021.
- Kesler, S., Gruber, P., Medina, P., Keoleian, G., Everson, M. & Wallington, T. (2012), *Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. Ore geology Reviews*. Vol. 48, Pages 55–69.
- Kyuok, K. (2022), *Electric Mobility Policies of Korea, Regional Meeting on Just Transition to Low Carbon Mobility in Asia and the Pacific and Joint Workshop on Electrification of Public Transport, UNESCAP*.
- McKinsey & Company & Global Battery Alliance (2023), *Battery 2030: Resilient, sustainable and circular*, January 16, 2023. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular#/>.
- León, M., Muñoz, C., & Sánchez, J. (eds.) (2020), *La gobernanza del litio y el cobre en los países andinos. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/124)*, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Liu, W., Agusdinata, DB & Myint, S.W. (2019), Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. *Revista Internacional de Observación Aplicada de la Tierra y Geoinformación*. Volumen 80, 145-156.
- Mazzucato, M. (2022), *Cambio transformacional en América Latina y el Caribe: un enfoque de política orientada por misiones (LC/TS.2022/150/Rev.1)*, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Ritchie, H. (2021), *Does the world have enough lithium to move electric vehicles? Sustainability by numbers*. En: <https://www.sustainabilitybynumbers.com/p/lithium-electric-vehicles>.
- S&P Global Market Intelligence (2022), *The Lithium Supply Crunch Doesn't Have to Stall Electric Cars*. August 23, 2022. En: <https://www.bcg.com/publications/2022/the-lithium-supply-crunch-doesnt-have-to-stall-electric-cars>.
- Sustainable Lithium (2023), *Sitio web de SQM, Sustainable Lithium*. En: <https://www.sustainablelithium.com/es/sustainable-lithium-cl/>.
- The Economist (2023), *How to avoid a green-metals crunch. With ingenuity, a 6.5bn-tonne problem may be dodged*, September 11th.
- _____(2023a), *Joe Biden's China strategy is not working. Supply chains are becoming more tangled and opaquer*, Aug 10th.

- _____ (2023b), A battery supply chain that excludes China looks impossible. Green industrial policy and hawkish security policies are clashing, Jul 17th.
- _____ (2023c), Tesla's surprising new route to EV domination. Become more like the industry you disrupted, Jul 18th.
- The White House (2023), Building a clean energy economy guidebook: A guidebook to the inflation reduction act's investments in clean energy and climate action, January, version 2.
- USGS (2024), Mineral commodity summaries 2024. United States Geological Survey.
- _____ (2023), Mineral commodity summaries 2023. United States Geological Survey.
- Wurzbacher, C., Gilbert, M., McAdoo, M., Niese, N., Smilkstins, A. y E. Reed (2022), The Lithium Supply Crunch Doesn't Have to Stall Electric Cars, Boston Consulting Group, August.
- Yang Andrew Wu, Artie W. Ng, Zichao Yu, Jie Huang, Ke Meng and Dong, Z. Y. (2021), A review of evolutionary policy incentives for sustainable development of electric vehicles in China: Strategic implications. Energy Policy, Volume 148, Part B, January.

Anexo A1

Entrevistas

Presentación-propuesta estudio "Perspectivas de desarrollo de la cadena de valor Reunión virtual".

Reunión Litio con estudiantes de la Academia Diplomática.

Entrevista Dr. Roberto Salvarezza-YTEC/YPF-Estudio Litio CEPAL.

Entrevista Dr. Martín Obaya-Estudio CEPAL Litio.

Entrevista con colegas de Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), Estudio Litio CEPAL (Adolfo Emerson Aramayo García; Maribel Valencia Ayaviri; Josue Catari; Benigno Mamani Cuenca).

Eventos

Webinar: El Triángulo del Litio Chile-Argentina-Bolivia: ¿Qué Oportunidades de Desarrollo ofrece? Fundación Chilena del Pacífico con la Universidad de Tres de Febrero de Argentina. <https://funpacifico.cl/eventos/webinar-el-triangulo-del-litio-chile-argentina-bolivia-que-oportunidades-de-desarrollo-ofrece/>.

Webinar La Realidad del Litio en Chile "Técnicas de Exploración en Salares". Cámara Minera de Chile. <https://www.youtube.com/watch?v=zsdoQOgDH5g>.

Webinar: "Perspectivas de la Exploración Minera en Chile". Cámara Minera de Chile. https://www.youtube.com/watch?v=oz_tlwmayfU.

Webinar Clapes UC: ¿Cómo maximizar el valor del litio para Chile? <https://www.youtube.com/watch?v=IW1SsrjhOas>.

Webinar Triángulo del litio | Desafíos y oportunidades. Organizado por Albagli Zaliasnik de Chile. <https://www.youtube.com/watch?v=UVWFsH7zcVc>.

CEPAL: transición hacia la energía verde y las industrias relacionadas. 12-07-2023 https://cepal-org.zoom.us/rest/webinar/registrant/WN_iKGG6kEiTbKeoCUTheyMJw/info?tk=-slzFJqv9TIME6X21UjxcawgMbTUKbbsheUEh1rY5Fi6OAg1W3Eh-Gc&ac=approved&timezone_id=America/Santiago#/registration.

Seminario: LITIO y FURE de Cobre, mayor soberanía para Chile. 21-08-2023.

Seminario Latinoamericano ¿Qué hacemos con el Litio? Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Expositor Juan Carlos Montenegro "La experiencia de aplicación del modelo soberano de industrialización del litio en Bolivia". <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=LSaIJ2WIDAQ>.

Seminario Latinoamericano ¿Qué hacemos con el Litio? Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Expositor Luis Alberto Escazú Alvarado "Estrategia de industrialización del litio y los recursos evaporíticos de Bolivia" <https://youtu.be/gccgRN8Y8no?t=3466>.

Seminario Latinoamericano: Aprovechamiento del Litio, las experiencias de Argentina y Chile. Expositores Federico Nacif "Explotación y aprovechamiento del litio en Argentina" y Mariana Cervetto "Litio en Chile" <https://www.youtube.com/watch?v=c4rA1N8GX2k&t=117545>.

La gobernanza del litio en los países del triángulo: marco normativo y estrategias. 24-08-2023. <https://cepalorg.zoom.us/j/87984522563?pwd=a3ZQSmdETW5ZZEpLMktCdTE2TXJTZz09>.

Transparencia y sustentabilidad ambiental y social. 07-09-2023, <https://cepal-org.zoom.us/j/87984522563?pwd=a3ZQSmdETW5ZZEpLMktCdTE2TXJTZz09>.

Desafíos de la Estrategia Nacional del Litio. 28 sept 2023. <https://acropolisd.cl/bienvenido-doble-seminario/>.

UDA - Litio y Pueblos Indígenas en la Región de Atacama. La estrategia nacional ante los DD.HH. 29 sept 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=su59cD8q8ao>.



NACIONES UNIDAS

Serie

CEPAL

Recursos Naturales y Desarrollo

Números publicados

Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en
www.cepal.org/publicaciones

223. Perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y América del Sur, Mario Castillo, Ingrid Garcés y Rodrigo Furtado Messias (LC/TS.2024/38), 2024.
222. Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Antonio Santos, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto (LC/TS.2024/36), 2024.
221. Oportunidades para la adopción del enfoque de cadenas de valor en el ámbito de los recursos hídricos, Elisa Blanco (LC/TS.2023/201), 2024.
220. Recursos naturales y desarrollo sostenible. Propuestas teóricas en el contexto de América Latina y el Caribe, Jeannette Sánchez y Mauricio León (LC/TS.2023/198), 2023.
219. Cuentas satélite de bioeconomía para 13 países de América Latina y el Caribe: metodología y resultados, Renato Vargas, Andrés Mondaini y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2023/138), 2023.
218. Necesidades de inversión en agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe: efectos en el empleo verde y el valor agregado bruto, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Alfredo Montañez, Santiago López, Lisbeth Naranjo y Alba Llavona (LC/TS.2023/101), 2023.
217. Diagnóstico de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en El Salvador, México y Panamá, Silvia Saravia Matus, Alfredo Montañez, Diego Fernández y Natalia Sarmanto (LC/TS.2023/96), 2023.
216. Pathways to sustainable planning for a just energy transition in Latin America and the Caribbean: an analysis of best practices in selected countries, Antonio Levy, Diego Messina, René Salgado and Rubén Contreras Lisperguer (LC/TS.2023/4), 2023.
215. Acción climática en la agricultura: la experiencia de países miembros de la Plataforma de Acción Climática en Agricultura de Latinoamérica y el Caribe, Walter Oyhantçabal y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2022/240), 2022.
214. Cuenta satélite de bioeconomía para Costa Rica: propuesta metodológica y aplicación práctica, Renato Vargas, Irene Alvarado, Mónica Rodríguez, Adrián Rodríguez y Paul Wander (LC/TS.2022/223), 2022.

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

Números publicados:

- 223 Perspectivas de desarrollo
de las cadenas de valor
relacionadas con el litio en Chile
y América del Sur
*Mario Castillo, Ingrid Garcés
y Rodrigo Furtado Messías*
- 222 Hoja de ruta técnica y financiera
para la recuperación de metano
y nutrientes de aguas residuales
en América Latina y el Caribe
*Silvia Saravia Matus, Diego Fernández,
Antonio Santos, Pedro Chavarro,
Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto*
- 221 Oportunidades para la adopción
del enfoque de cadenas de valor
en el ámbito de los recursos hídricos
Elisa Blanco