



MINUTA TÉCNICA

Evolución de la industria del litio en Chile y el impacto de la Estrategia Nacional del Litio

Jorge Valverde-Carbonell
United Nations University UNU-MERIT
valverde@merit.unu.edu

Este documento tiene como objetivo aportar a la elaboración de recomendaciones de política pública para la explotación sostenible de litio en Chile. Fue elaborado por Jorge Valverde, con la colaboración de Annie Dufey y Marcela Angulo, directoras de Espacio Público; de Rodrigo Guerrero y Benjamín Hennigs, del equipo de investigación. A su vez, contó con el apoyo de Open Society Foundations.

1. Introducción

La industria mundial del litio experimentó un quiebre estructural durante la segunda mitad de la década anterior, como consecuencia de la creciente demanda –y expectativas de mayor demanda– por vehículos eléctricos, los cuales emplean baterías recargables de ion-litio que consumen gran cantidad de este mineral. Las proyecciones de distintos organismos especializados muestran que la entrada de vehículos eléctricos seguirá en aumento: tanto por el cambio tecnológico, que abarata su costo de producción, como por los incentivos fiscales de los gobiernos, que promueven su uso. Por consiguiente, se espera que la demanda por litio también crezca en el tiempo (World Bank Group, 2020); (International Energy Agency, 2021); (Chilean Copper Commission, 2023).

Estamos hablando, entonces, de una profunda transformación en la escala de la industria mundial, dentro de la cual se evidencian dos cambios sumamente relevantes: el mix de productos de la industria y el poder de mercado de China.

En relación con el primer fenómeno, se observa un cambio significativo en el mix de productos, impulsado por la evolución de los requerimientos de la cadena de valor aguas abajo (material catódico y baterías recargables de ion-litio): en particular, se aprecia el crecimiento progresivo en la demanda por hidróxido de litio, lo cual redistribuye las ventajas comparativas de la industria, a favor de los yacimientos de espodumeno (Chilean Copper Commission, 2023). No obstante, la alta intensidad de emisiones de CO₂ que genera la producción de litio desde roca y las (potenciales) regulaciones ambientales y comerciales al respecto (Kelly, Wang, Dai, & Winjobi, 2021), sostienen la competitividad del litio de salmuera en el largo plazo y generan incentivos a la comercialización de productos intermedios, como el cloruro y el sulfato de litio.

Por otra parte, el poder de mercado de China se observa a partir de la creciente concentración en el procesamiento de litio, el cual sobrepasa 60% del mercado. En particular, el poder de mercado se concentra en la producción de hidróxido de litio, donde la participación alcanza cerca de 80%, ya que la mayoría de este compuesto se obtiene desde el espodumeno australiano, el cual se procesa casi en su totalidad en las refinerías de China (Valverde-Carbonell & Micco, 2024).

En este contexto global, Chile emerge como un actor protagónico de la industria del litio, ya que es el segundo mayor productor de litio primario a nivel mundial: esto se explica por la magnitud de las reservas que posee el salar de Atacama, y por el bajo costo de extracción y procesamiento hasta obtener (principalmente) carbonato de litio. No obstante, durante la última década, Chile ha perdido participación de mercado frente a países como Australia (líder de la industria) y Argentina, dada su estructura institucional. Por motivos históricos y ecológicos, el marco chileno se caracteriza por tres restricciones: su condición de mineral no concesible; cuotas de extracción de salmuera y agua; y cuotas de comercialización de litio metálico.

Recientemente, el gobierno de Chile ha puesto en marcha la Estrategia Nacional del Litio, cuyo objetivo central es resolver los problemas de institucionalidad y así expandir sosteniblemente la industria del litio. Las primeras políticas anunciadas en el marco de esta estrategia han sido el acuerdo de asociación entre SQM y Codelco, y

la definición de Salares Estratégicos. Respecto a la primera, se crea (en proceso) un *joint venture* que extiende y expande la operación actual de SQM en el Salar de Atacama¹ hasta el año 2060, dejando el control de esta nueva empresa en manos de Codelco. Mientras que, respecto a la segunda política, se definen como estratégicos los salares de Atacama y Maricunga (los dos con mayor potencial económico), lo cual significa que los nuevos proyectos que se quieran desarrollar en ellos serán controlados por el Estado, a través de sus empresas públicas.

En este contexto, el presente estudio se centra en analizar cuatro puntos específicos:

- Proyección del balance de mercado de la industria mundial de litio al año 2035.
- Diagnóstico sobre los factores que determinan la competitividad de la industria del litio en Chile.
- Proyección de la producción de litio de Chile al año 2035 (incorporando las nuevas políticas anunciadas).
- Efectos de cambios en la composición del mix de productos de litio sobre la economía.

Los principales resultados de este estudio muestran que:

- El balance de mercado en base al escenario de demanda *Announced Pledge* (APS) es deficitario para el periodo 2030-2035, mientras que bajo el escenario *Net Zero* (NZS) es deficitario durante todo el periodo 2024-2035. Solo en el escenario *Stated Policies* (SPS) la oferta cubre la demanda durante todo el periodo; no obstante, este escenario es completamente insuficiente para lograr los objetivos climáticos.
- El marco institucional limita el desarrollo de la industria, a través de restricciones empresariales, técnicas y ambientales. Las dos primeras obedecen al diseño institucional originado a principios de los 80 en un contexto de Guerra Fría, donde el litio era estratégico para fines nucleares. Mientras que la última restricción obedece a la naturaleza de los salares, fuente primaria de litio en Chile, considerados ecosistemas frágiles que pueden sufrir daños irreparables si se sobreexplotan. Por lo tanto, su sostenibilidad ambiental y productiva depende del nivel de servicios ecosistémicos que se extraigan en el corto plazo.
- En el caso de concretarse el acuerdo entre SQM y Codelco, así como los contratos especiales de operación de litio (CEOL) en el salar de Maricunga, su producción en Chile podría alcanzar las 537.5 mil toneladas de LCE al año 2035, con lo cual el efecto en producción de la Estrategia Nacional del Litio superaría las 201 mil toneladas de LCE anuales al año 2035. No obstante, la participación de mercado seguiría en descenso, llegando a 15% del mercado mundial (como referencia el año 2022 alcanzó 28%).
- La composición de la oferta de litio tiene un impacto directo sobre el valor agregado de la industria. Dependiendo del precio de mercado, bienes intermedios como el sulfato de litio pueden entregar mayor rentabilidad. Sin embargo, el valor agregado que reportan a la economía es menor.

¹ Donde se concentra casi la totalidad de las reservas.

- La restricción de oferta hace que las innovaciones que aumentan la productividad del salar puedan tener un efecto negativo sobre el valor agregado de la industria. Por ejemplo, la obtención de sulfato de litio desde salmueras no productivas aumenta la producción de litio, pero resta intensidad de valor agregado, ya que la cuota de producción hace que la elaboración de sulfato implique la menor producción, a su vez, de carbonato. En este sentido, es clave colocar los incentivos correctos para que las innovaciones permitan capturar rentas a los privados y encadenar la producción aguas abajo.

El estudio continúa con la sección II, donde se aborda el mercado mundial del litio. La sección III presenta un diagnóstico sobre la industria nacional del litio, mientras que la sección IV muestra las proyecciones de la industria nacional para el periodo 2024-2035. Finalmente, la sección V analiza el efecto de la composición del mix de productos de litio sobre el valor agregado de la industria local.

2. Mercado mundial: Proyección de la oferta y demanda de litio

El mercado del litio sufrió un quiebre estructural durante la segunda parte de la década anterior, a partir del aumento exponencial de los automóviles eléctricos, los cuales tienen como componente clave las baterías recargables de ion-litio. Este cambio estructural también modificó el mix de productos de la industria del litio, registrándose un progresivo ascenso de la participación del hidróxido de litio. Entre los años 2011 y 2022, el mercado del litio se expandió casi seis veces y el hidróxido de litio ganó participación de mercado, hasta alcanzar 27,6%. En cuanto a los usos del litio, las baterías eléctricas representaban 23% en 2011, mientras que en 2020 alcanzaron 71% (Economic Commission for Latin America and the Caribbean, 2022).

El auge de la demanda por litio ha sido desencadenado por el dinamismo de su principal cadena de valor aguas abajo: las baterías recargables de ion-litio. El rápido cambio tecnológico en la industria de las baterías y material catódico ha repercutido en el mix de productos químicos demandados aguas arriba. Por ejemplo, hasta hace pocos años atrás el mercado de litio se concentraba casi exclusivamente en la producción de carbonato de litio, no obstante, durante los últimos años el hidróxido de litio ha ganado progresivamente participación de mercado y se espera que durante la próxima década alcance al carbonato. Esta tendencia se explica por la batalla tecnológica librada entre las baterías LFP y NCM, donde la competencia se ha basado en las características operacionales y costo de producción. Adicionalmente, el cambio tecnológico ha sido apalancado también por restricciones de mercado (voluntarias y no voluntarias) que han significado un incentivo para la sustitución tecnológica, tales como la prohibición de Indonesia de exportar níquel no procesado o las empresas que han decidido no comprar cobalto de Congo D.R, por las condiciones laborales. Ejemplo de lo anterior es la sustitución de baterías NCM por LFP, o bien, cambio en la composición de las baterías NMC, pasando de una estructura 60-20-20 a una 80-10-10 de níquel, cobalto y manganeso, respectivamente.

Las proyecciones muestran que la demanda por litio aumentará proporcionalmente a la entrada de los automóviles eléctricos (EV). Considerando que el recambio del parque vehicular es una de las principales medidas impulsadas por los países desarrollados para mitigar el cambio climático y reducir la contaminación atmosférica, y que el cambio tecnológico en torno a los EV ha evolucionado rápidamente –reduciendo considerablemente los costos de producción–, se espera que la demanda por vehículos eléctricos aumente significativamente durante las próximas décadas y, con ello, también la demanda y oferta de litio. De hecho, se estima que al año 2035 los vehículos eléctricos representen más de 50% del mercado; un aumento considerable, dado que en 2022 representaron solo 14% (Chilean Copper Commission, 2023). Respecto a cómo será la composición de esta mayor demanda por productos de litio, no existe un consenso entre los expertos y hay posturas que pronostican una solución esquiva (mercado 100% carbonato de litio o 100% hidróxido de litio). Sin embargo, la opinión dominante es que el mercado convergerá a un equilibrio balanceado entre carbonato e hidróxido de litio.

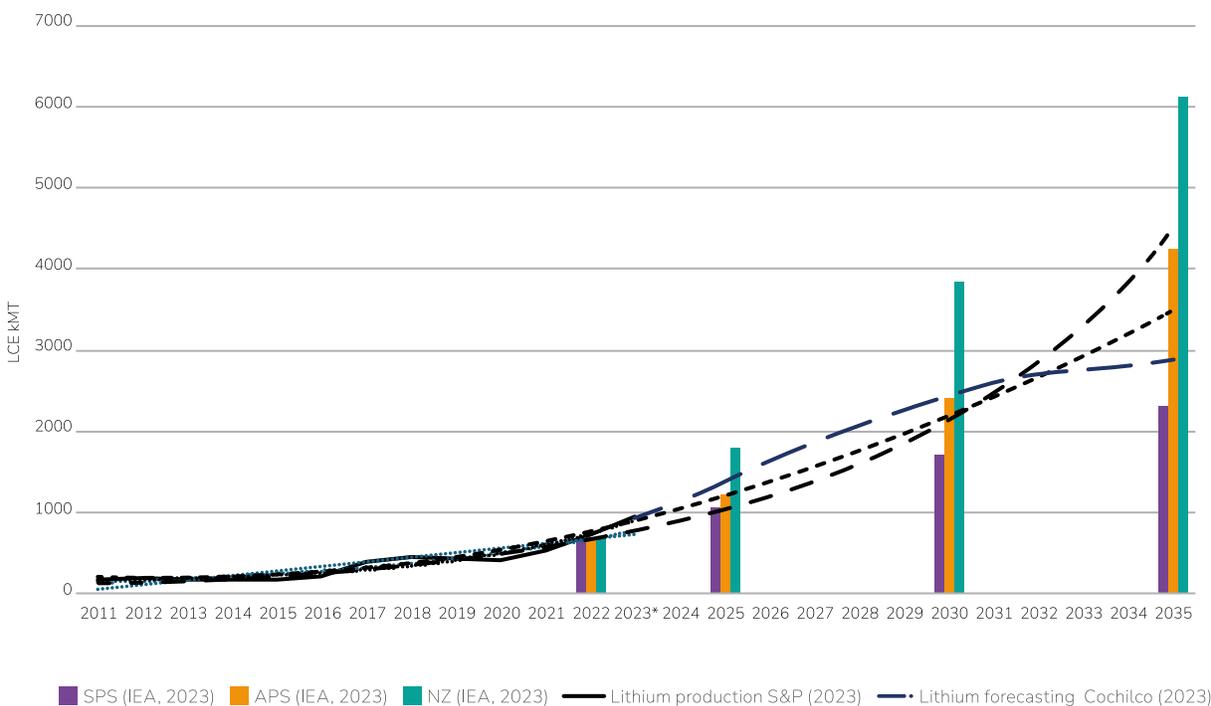
Estas proyecciones convierten al litio en uno de los minerales más críticos para la transición energética (International Energy Agency, 2021); (Valverde, Menéndez, & Pietrobelli, 2023), abriéndose las siguientes interrogantes: ¿Cuánto litio se necesita para alcanzar las metas de mitigación climática? ¿Cuánto litio puede proveer el mundo para estos fines?

La presente subsección busca responder a las preguntas anteriores, a partir de un análisis que incorpora proyecciones de oferta y demanda previamente realizadas por organismos especializados, como son la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) y la Agencia Internacional de Energía (IEA), con un análisis de series de tiempo que proyecta la tendencia no lineal que ha seguido la producción de litio desde la década anterior. Específicamente, se generan dos escenarios de producción de litio al año 2035 en base a la proyección de la curva de oferta evidenciada en el periodo 2011-2023, y se contrasta con la proyección efectuada por Cochilco y la proyección de demanda realizada por la IEA (International Energy Agency, 2023).

La figura 1 muestra el resultado de este ejercicio, en el cual la proyección de la producción en base a una tendencia cuadrática (línea negra de segmentos pequeños) prevé una oferta mundial en torno a 3,500 kTM (LCE) hacia el año 2035, mientras que la proyección en base a una tendencia exponencial (línea negra de segmentos grandes) estima la producción sobre las 4,000 kTM (LCE). El ajuste (dentro de muestra) del modelo polinómico de segundo grado es de 0.93, mientras que el ajuste del modelo exponencial es de 0.92.

En la misma figura, se aprecia la proyección de Cochilco (línea segmentada celeste), la cual muestra tasas de crecimiento decrecientes hasta rondar las 3,000 kTM (LCE) hacia el año 2035. Asimismo, las barras de color rojo, amarillo y verde ilustran la demanda estimada por la IEA en distintos escenarios de ambición climática para los años 2025, 2030 y 2035. Específicamente, la barra roja, amarilla y verde reflejan la estimación en base a los escenarios Stated Policy Scenario (SPS), es decir, las políticas ya establecidas; Announced Pledge Scenario (APS), o políticas comprometidas; y Net Zero (NZ), aquellas políticas para alcanzar emisiones netas igual a cero.

Figura 1. Proyección del balance del mercado mundial del litio (2024-2035)



Fuente: Estimación propia a partir de información de S&P y Cochilco.

La diferencia entre las estimaciones propias y la de Cochilco radica en la tasa de crecimiento de la oferta de litio. Cochilco proyecta una tasa de crecimiento decreciente, en base a proyecciones sobre la entrada de vehículos eléctricos al mercado, mientras que nuestras estimaciones proyectan tasas de crecimiento crecientes, en base a la serie de tiempo de producción de litio. Al respecto, creemos que en el largo plazo –al ser todos los factores de producción variables– la producción debiera ajustarse mejor a las presiones de demanda y, por lo tanto, si la demanda crece a una tasa creciente, la oferta también debiese hacerlo. Así, la curva de oferta debiese ser más similar a la nuestra que a la de Cochilco.

La divergencia entre la proyección de Cochilco y la proyección polinómica de grado dos (cuadrática) son aproximadamente 500 kTM (LCE) al año 2035, mientras que la diferencia respecto a la proyección exponencial son 1,500 kTM (LCE). Estas divergencias se traducen en distintos escenarios de balance de mercado. En base al escenario de demanda Net Zero (NZ), todas las proyecciones de oferta arrojan como resultado un mercado deficitario. No obstante, el déficit es mayor en el corto plazo que en el largo plazo, según nuestras estimaciones, mientras que a partir de las proyecciones de Cochilco es al revés. En base al escenario de demanda Announced Pledge (APS), nuestras proyecciones muestran un mercado balanceado/levemente deficitario al 2025 y deficitario al 2030, mientras que las proyecciones de Cochilco arrojan un mercado superavitario al 2025 y balanceado al 2030. Finalmente, en base al escenario de demanda Stated Policies (SPS), nuestras proyecciones arrojan un mercado levemente superavitario/balanceado al 2025 y superavitario al 2030.

3. Diagnóstico de la industria del litio en Chile

Chile presenta ventajas comparativas naturales y tecnológicas para la producción de litio, en particular carbonato de litio. Esto se debe a las reservas y la alta concentración de litio que posee el salar de Atacama (única fuente de producción operativa), a la disponibilidad de una serie de otros salares económicamente explotables y a las ventajas tecnológicas que Chile ha ido desarrollando durante décadas. Estas ventajas se pueden resumir en cinco factores claves:

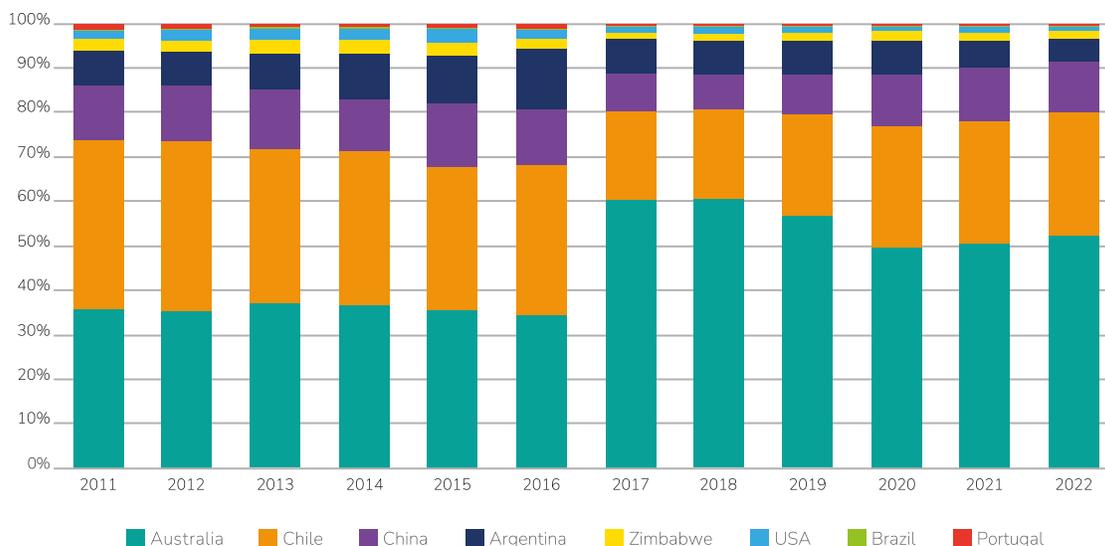
- Chile es el país con mayores reservas de litio a nivel mundial, es decir, posee la dotación del recurso natural necesaria para su producción (Cabello, 2021); (U.S Geological Service, 2024).
- Chile es el segundo mayor productor de litio del mundo, es decir, ya posee *know-how* y economías de escala para su producción y exportación (U.S Geological Service, 2024).
- Chile exporta litio a través de una gama de compuestos químicos², es decir, exporta productos procesados que incorporan valor agregado más allá del valor del recurso en sí. Si bien, la producción se concentra en carbonato de litio, también posee las capacidades para exportar otros tipos de compuestos, e incluso está naciendo una incipiente industria de cátodos de litio (Pietrobelli & Valverde, 2024).
- Chile posee una ventaja comparativa en la producción de carbonato de litio vis á vis al líder de la industria (Australia), la cual está dada por los menores costos que significa extraer litio desde salares versus extraerlo desde rocas (Jiménez & Sáez, 2022); (Pietrobelli & Valverde, 2024).
- Chile posee una menor huella ambiental en la producción de litio, ya que la producción desde salmuera emite considerablemente menos CO₂ al ambiente y consume menos agua que la extracción desde roca. Esto se traduce en una ventaja competitiva, desde el paradigma de producción baja en carbono (Kelly, Wang, Dai, & Winjobi, 2021); (Valverde-Carbonell & Micco, 2024).

Sin embargo, el marco institucional de Chile es rígido y complejo, lo cual representa una restricción a la capacidad productiva, (Poveda Bonilla, 2020). La rigidez institucional y la falta de visión para adaptar la industria al nuevo contexto mundial (boom de las baterías recargables), significó que Chile perdiera significativamente participación de mercado durante la década anterior (ver figura 2).

La institucionalidad del litio se ha ido configurando sobre la marcha, a partir principalmente de actos administrativos, los cuales han respondido a la voluntad y capacidades de cada gobierno, sin poder consolidar una política estatal duradera. Actualmente, la expansión de la oferta de litio solo se puede efectuar a través de la firma de un Contrato Especial de Operación de Litio (CEOL), o la modificación de los vigentes. Los únicos CEOL que se han firmado durante las últimas décadas han sido renegociaciones con las dos empresas que producen litio en el Salar de Atacama desde las décadas de los 80s y 90s.

² Cloruro, sulfato, carbonato e hidróxido de litio, siendo el carbonato y el hidróxido los que han concentrado casi la totalidad de la producción. No obstante, durante 2023 se evidenció un gran aumento en las exportaciones de sulfato.

Figura 2. Evolución de la participación en el mercado primario de litio (2011-2022)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del USGS.

Desde una perspectiva económica, la institucionalidad chilena del litio presenta una triple restricción³ para la industria del litio: no concesibilidad, límite de extracción de agua y salmuera, y cuotas de comercialización de litio metálico. A continuación, se detallan dichas restricciones:

MINERAL NO CONCESIBLE

Esta restricción obedece a la naturaleza jurídica que Chile otorgó al litio el año 1979, a través del Código de Minería y de la Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras. Aquí se establece que el litio es un mineral no concesible y solo puede ser explorado y explotado por el Estado y sus empresas, o a través de terceros mediante contratos especiales de operación de litio (CEOL). Esto obedeció a razones estratégicas en un contexto de Guerra Fría, en el cual el litio era un elemento clave en términos nucleares, sin embargo, la normativa permanece vigente.

Por lo tanto, la oferta no tiene la capacidad de adaptarse rápidamente a los cambios de tendencia de la demanda de litio, ya que esto requiere modificar los CEOL vigentes o generar nuevos CEOL, lo cual es lento y complejo. Esto ha significado en la práctica que Chile solo explote litio desde el salar de Atacama a través de dos operaciones de larga data, SQM y Albemarle, y que la capacidad instalada de producción evolucione a partir de decisiones estatales (como las modificación de los CEOL) y no producto de los incentivos de mercado.

³ Como veremos a continuación, hay restricciones que tienen por objetivo limitar las externalidades negativas que se originan en el proceso de extracción de litio (restricción ambiental), por lo cual no son socialmente ineficientes. De hecho, el beneficio privado neto se ve reducido (restricción de oferta), pero el bienestar social neto se ve incrementado al considerar el costo social de la producción (siempre y cuando el límite de la restricción esté bien establecido). Sin embargo, que la restricción sea económicamente eficiente no impide que exista una merma en la competitividad, a menos que los otros países apliquen principios similares.

LÍMITE DE EXTRACCIÓN DE SALMUERA Y AGUA

Esta restricción está dada por el límite de extracción de salmuera y agua autorizada por la autoridad ambiental en la evaluación de impacto ambiental, la cual tiene por objetivo resguardar el salar y su ecosistema. La tecnología de extracción vigente de litio consume intensivamente agua, ya que consiste en el bombeo de la salmuera y su posterior evaporación para recuperar el litio. Además, el proceso productivo requiere de agua para su funcionamiento, que se obtiene de pozos aladaños al salar. Por lo tanto, la producción de litio es una función directa del consumo de agua (salmuera y dulce).

Por lo tanto, esta restricción puede considerarse una restricción “natural” que busca promover su sostenibilidad (permite incorporar las externalidades negativas). En este sentido, el reto es establecer ese límite natural, que –dada la complejidad de un salar– no es estático y debe ser monitoreado constantemente. Un efecto positivo de esta restricción es que ha promovido la innovación y cambio tecnológico, incentivando el desarrollo de técnicas como la extracción directa de litio, la cual es menos intensiva en el uso de salmuera. Sin embargo, todavía no conocemos el impacto ambiental total de estas tecnologías, a la vez que aún no son competitivas respecto a la tradicional (Espacio Público, 2024), pero sí respecto a la línea del espodumeno.

CUOTAS DE COMERCIALIZACIÓN DE LITIO

Esta restricción corresponde al límite que la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) establece sobre la producción y comercialización de litio, y que define la cuota de litio metálico acordada vía administrativa entre el Estado y las empresas. Por ende, modificar los volúmenes de producción de los CEOL vigentes o determinar la producción asociada a nuevos CEOL requiere de la aprobación previa de la CChEN. De esta forma, la producción de litio no solo se limita por el lado del *input* (cantidad de salmuera extraída), sino también por el *output* generado (producción de litio). En la práctica esto implica imponer coeficientes técnicos de producción fijos, limitando las ganancias de eficiencia producto del cambio tecnológico, lo cual no tiene razonabilidad económica dado que no implica un mayor costo social (externalidad negativa de extracción de salmuera).

Los problemas de institucionalidad en torno al litio, además de sus efectos prácticos, han sido diagnosticados desde fines de la década de los 2000 y han sido abordados por el Estado chileno desde entonces, a través de distintas políticas: desde la Comisión Nacional del Litio en 2014, hasta negociaciones bilaterales de CEOL (Espacio Público, 2024). Recientemente, tres nuevos hitos se sumaron a la lista: i) Estrategia Nacional del Litio (2023), ii) Acuerdo entre Codelco y SQM (2024), y iii) Clasificación de salares (2024). Donde ii) y iii) son acciones para implementar el punto i).

Si bien, la alianza público-privada entre Codelco y SQM acaba de ser establecida, faltando detalles prácticos de su implementación, y la clasificación de salares da solo un primer lineamiento sobre qué salares se podrían explorar y explotar (y bajo qué modalidades), ambas políticas agregan información relevante para estimar el efecto sobre la industria del litio nacional y, por ende, sobre la economía nacional. Es justamente el efecto de estas últimas políticas lo que se aborda en la sección siguiente.

4. Proyección de la producción de litio en Chile

La Estrategia Nacional del Litio, en temprana implementación, modifica el marco institucional y dinamiza la oferta a través de un esquema donde el Estado adquiere un rol empresarial protagónico. Esto se manifiesta tanto en el acuerdo entre Codelco y SQM, donde la extensión del contrato de SQM –desde el año 2031– es a cambio del control de empresa por parte de Codelco; y del listado de salares a ser sujetos de explotación, que implica que los salares con mayor potencial productivo se reservan para la explotación del Estado o en conjunto con el Estado. Por su parte, para los salares no estratégicos, los privados pueden expresar su intención de explotación y firmar CEOLs. Por lo tanto, la expansión de producción de litio seguirá estrechamente determinada por la capacidad estatal, sumándose a lo institucional-regulatorio, la capacidad de Codelco y Enami de establecer asociaciones público-privadas, definir los contratos y gestionar las nuevas empresas.

La presente sección tiene por objetivo proyectar la producción de litio de Chile para el periodo 2024-2035, considerando el efecto sobre la producción del acuerdo Codelco-SQM y el listado de salares susceptibles a ser explotados. La proyección se realiza desde una perspectiva *bottom-up*, es decir, sumando la producción esperada de las distintas operaciones vigentes y proyectos entrantes. La información primaria se obtiene desde fuentes públicas de información a partir de lo señalado por las mismas empresas y de los remanentes de cuotas vigentes de explotación. Los resultados de este ejercicio se contrastan con la última proyección realizada por Cochilco.

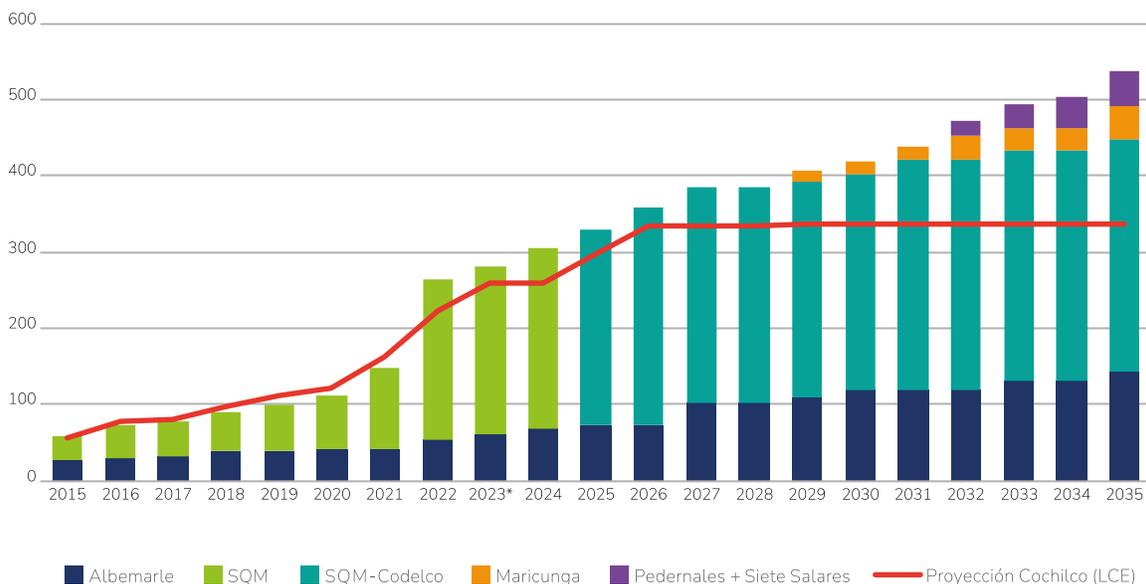
Los principales supuestos empleados para la proyección son:

- SQM consume la cuota restante del contrato vigente (1,600 mil toneladas de LCE), más las 300 mil establecidas en el preacuerdo con Codelco. Esto implica una producción de 1,900 mil toneladas de LCE entre 2024 y 2030.
- A partir del año 2031, SQM aumenta su producción de carbonato e hidróxido a 303 mil toneladas anuales, en línea con lo estipulado en el preacuerdo con Codelco.
- Albemarle aumenta su cuota de producción al doble, lo cual se traduce en un aumento progresivo de su producción hasta alcanzar 144 mil toneladas de LCE anuales al 2035.
- Codelco consolidará las operaciones en el salar de Maricunga y comenzará a producir junto a terceros el año 2029. En una fase inicial, Maricunga producirá 15 mil toneladas de LCE anuales, las cuales aumentarán progresivamente hasta alcanzar 45 mil toneladas el año 2035.
- Los salares de Pedernales (Codelco) y Siete Salares (Enami) comenzarán a producir el año 2032. En conjunto, sumarán 20 mil toneladas de LCE el año 2032, las cuales aumentarán hasta 45 mil toneladas el año 2035.

La figura 3 muestra la proyección de demanda de litio (LCE) desagregada por operación en el caso del Salar de Atacama y agregada en los casos de los salares de Maricunga y Pedernales, y Siete Salares. Se considera que estos son los únicos nuevos salares que producirán litio durante el periodo de estudio (2024-2035). En el caso de SQM, se incorporan los efectos sobre la producción del acuerdo con Codelco a partir del año 2025. En el caso de Albemarle se incorpora la duplicación de su cuota de producción.

Adicionalmente, se muestra la última proyección pública realizada por Cochilco (2023), para lo cual consideramos el escenario previo a la Estrategia Nacional del Litio. Nuestra línea base, o *business as usual* (BAU), considera el aumento de producción estipulado en el acuerdo Codelco-SQM y la mayor cuota otorgada a Albemarle. Mientras que nuestro escenario esperado incluye la entrada en operación de los salares de Maricunga, Pedernales y Siete Salares.

Figura 3. Producción y proyección de la oferta de litio de Chile (2015-2035)



Fuente: Estimación propia en base a los supuestos señalados.

De la figura anterior destaca que:

- Nuestra proyección arroja que Chile producirá 537.5 mil toneladas de LCE al año 2035, es decir, 201.5 mil toneladas más (+60%), que lo proyectado por Cochilco previo a la Estrategia Nacional del Litio.
- El potencial acuerdo entre SQM y Codelco sería el principal impulsor del aumento de producción de litio de aquí al 2030.
- La mayor producción esperada al año 2035 respecto al año 2023 se distribuye equitativamente entre SQM, Albemarle y los nuevos salares.
- La entrada de los salares de Maricunga, Pedernales y Siete Salares podría representar cerca de 17% de la producción nacional de litio al año 2035.

Si bien la producción proyectada aumenta sostenidamente en el tiempo, cuando se compara la tasa de crecimiento de la oferta nacional versus la tasa de crecimiento de la oferta mundial, se observa que la oferta mundial crece mucho más rápido (figura 1). Esto se traduce en una disminución de la participación de mercado y refleja una pérdida de competitividad. En términos concretos, Chile registró una participación de mercado de 28% el año 2022 y, a partir de nuestra proyección de oferta (mundial y nacional), estimamos que al año 2035 su participación se reducirá a 15%.

Por lo tanto, incluso en el escenario más optimista proyectado en la figura 2, donde nuevas operaciones empiezan a producir en los salares de Maricunga, Pedernales y Siete Salares, la respuesta de la oferta chilena de litio a la mayor demanda mundial es débil. La pérdida de competitividad de 13 puntos porcentuales de participación de mercado refleja que el resto del mundo es capaz de aumentar su producción mucho más rápido que Chile, pese a que somos el país con mayores reservas del mundo.

Ahora bien, la pérdida de participación de mercado puede considerarse como una consecuencia inevitable dada la fuente primaria de litio, ya que la extracción desde salares posee una restricción natural dada por el volumen de salmuera extraída. Mientras que la extracción desde roca (pegmatitas) no. Sin embargo, cambios tecnológicos que disocian la producción de litio respecto a la extracción del salmuera vuelven inactiva esta restricción y, por ende, hacen endógena la producción de litio. Por lo tanto, la política económica sí tiene un rol que cumplir al respecto.

5. Efecto de la composición de la oferta sobre el valor agregado de la industria

La producción de litio de cada operación en Chile está acotada por la cuota definida en el CEOL respectivo. Si solo existiese un producto de litio comercializable, la sumatoria del promedio anual de las cuotas definiría el valor agregado esperado de la industria. Sin embargo, existen cuatro principales productos de litio; carbonato, hidróxido, sulfato y cloruro. Los primeros dos pueden considerarse productos finales de la industria de procesamiento de litio, mientras que los dos últimos corresponden a productos intermedios de esta industria. Así, el valor agregado de la industria es en función tanto de la cuota como del mix de producto escogido por cada firma. Producir una tonelada de un determinado compuesto de litio tiene como costo de oportunidad el valor agregado de no producir otro compuesto, lo cual se explica no solo por el costo de oportunidad de la asignación de las inversiones, sino también por la asignación del consumo de la cuota.

La definición del mix de productos ofertados por las firmas depende de las ventajas competitivas de estas (estructura de costos) y de la demanda. Las ventajas competitivas a su vez están en función de la fuente primaria de litio y la tecnología empleada para su producción.

Las dos fuentes principales de donde se extrae el litio son pegmatitas (rocas) o salmueras (salmueras). La producción de litio a partir de pegmatitas puede considerarse una tecnología de producción clásica del sector minero, ya que contempla una serie de procesos usuales en la minería, tales como: chancado, molienda, separación, flotación, calcinación y lixiviación, entre otros. Mientras que la producción de litio a partir de salmueras sigue un proceso menos "minero" y más químico, ya que la fase de extracción se lleva a cabo mediante el bombeo de salmuera que es depositada en estanques para su purificación y, luego, la concentración se realiza mediante la evaporación solar y reactivos químicos (Jiménez & Sáez, 2022).

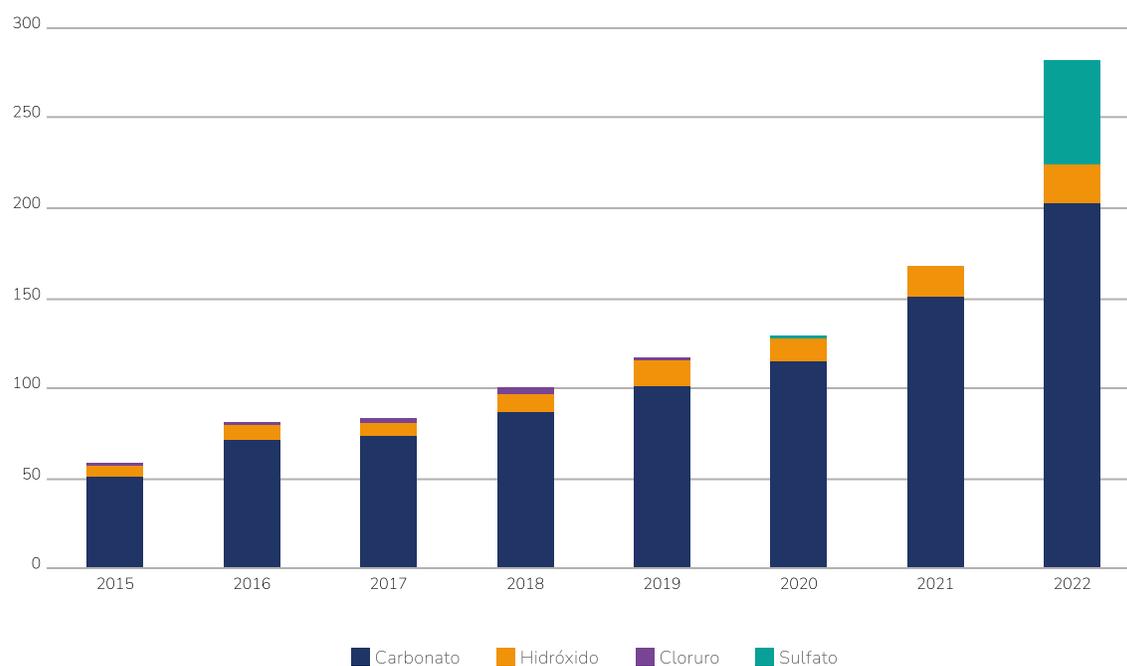
Por otra parte, los dos principales compuestos de litio comercializados son el carbonato y el hidróxido. Las tecnologías vigentes permiten obtener directamente carbonato de litio a partir de espodumeno (roca) o de cloruro de litio contenido en las salmueras; mientras que el hidróxido de litio solo se elabora directamente a partir de espodumeno. El hidróxido de litio producido desde salmueras utiliza como producto intermedio el carbonato de litio, por lo cual se considera producción secundaria. Sin embargo, desarrollos tecnológicos recientes han permitido la producción de hidróxido de litio a partir de mineral extraído desde salmueras sin pasar por carbonato de litio. Específicamente, SQM logró concentrar sulfato de litio a partir de salmuera con alta concentración de sulfato de litio, no útil para la producción de carbonato de litio. El sulfato de litio fue posteriormente exportado a plantas en China para su transformación en hidróxido de litio.

La producción directa de hidróxido de litio desde salmueras introduce oportunidades y desafíos para los países que producen litio a partir de esta fuente primaria. Por un lado, la nueva tecnología elimina el carbonato de litio como bien intermedio, lo cual aumenta la competitividad del hidróxido desde las salmueras. Por otro lado, implica realizar un upgrade tecnológico para adoptar eficientemente la nueva tecnología. El riesgo de no lograr el dominio de la nueva tecnología es retroceder en términos de procesamiento y valor agregado de los productos comercializados, ya que los países que logren dominar la tecnología demandarán cloruro y sulfato de litio como bienes intermedios.

De esta forma, el aumento de la demanda por hidróxido de litio pone incentivos para que los países productores de litio desde salmuera, como Chile y Argentina, exporten bienes intermedios de litio con menor valor agregado, como son el cloruro y sulfato de litio. O puesto en términos positivos, la mayor demanda por hidróxido de litio incentiva el cambio tecnológico para producir hidróxido de litio de manera directa en desmedro de la producción de carbonato de litio.

Al observar el mix de productos de Chile, se observa que la producción se ha concentrado históricamente en el carbonato de litio. Sin embargo, las estadísticas del año 2022 (ver figura 4) muestran un boom en la producción de sulfato de litio, lo que en la práctica reduce la intensidad del valor agregado exportado por Chile. Durante este año la producción de sulfato representó un tercio de la producción total del país.

Figura 4. Composición de la producción de litio de Chile (LCE)



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Sernageomin.

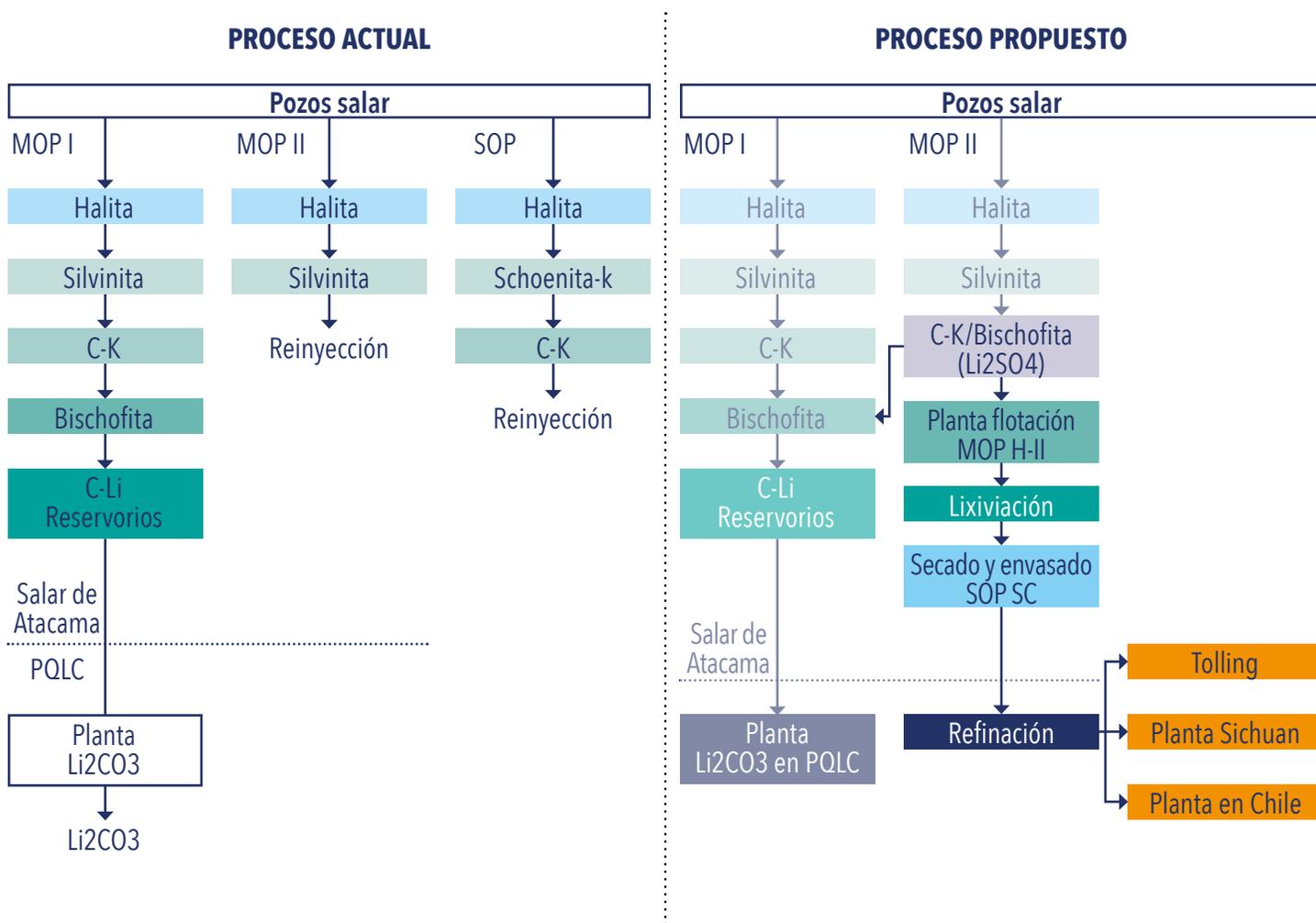
La producción de sulfato de litio se explica por una innovación productiva de SQM que le permitió procesar salmueras no productivas (altas en sulfato) que, anteriormente, se reinyectaban al salar. El sulfato de litio se utiliza como bien intermedio (precursor) para la producción de hidróxido de litio. No obstante, Chile no posee aún esta línea de producción de hidróxido, por lo cual la totalidad del sulfato se exporta. La figura 5 da cuenta de la innovación en el proceso productivo.

Esta nueva línea de producción se debe a un cambio tecnológico que aumenta la productividad y explota los principios de economía circular, ya que emplea insumos que antes se descartaban (reinyección de salmuera o acopio) y la capacidad instalada ociosa (pozas no operativas). Además, tiene ventajas ambientales significativas respecto a

la producción de hidróxido de litio a través de la ruta tradicional (usando carbonato de litio como bien intermedio), dado que tanto la huella de carbono como la huella hídrica son menores (esta última es considerablemente menor)⁴. Sin embargo, la restricción de producción dada por la cuota de extracción, genera un efecto sustitución que podría tener efectos negativos sobre el valor agregado del sector. Específicamente, una tonelada de sulfato de litio (LCE) implica una tonelada menos de carbonato de litio, dada la cuota de producción de litio.

SQM posee *strings* de 15 kton/LCE año que le permiten producir sulfato de litio con una concentración de 85%, el cual exporta para ser procesado en China donde posee una planta propia con capacidad de 30 kton/LCE.

Figura 5. Proceso de producción del sulfato de litio



Fuente: SQM – Vinculación con universidades y producción de sulfato de litio (2023).

⁴ SQM – Vinculación con universidades y producción de sulfato de litio (2023).

Si consideramos que previo a este cambio tecnológico la salmuera era devuelta al salar o acopiada como material de descarte, y que la producción de sulfato de litio consume parte de la cuota de litio, se da la paradoja que una innovación que aumente la productividad tiene un efecto negativo sobre la intensidad del valor agregado de la industria. Esto se explica porque la restricción de oferta (cuota de litio) hace que cada tonelada de sulfato de litio tenga como costo de oportunidad el equivalente en litio metálico de toneladas de carbonato de litio, que se podrían haber producido en su lugar. En base a estimaciones propias (año 2022), el costo de producción del sulfato de litio rondaría los US\$600 y su precio de venta los US\$22,000. Por su parte, el costo de producción del carbonato de litio ascendió a US\$4,500 y su precio de venta a US\$37,000. Luego, el margen operacional del sulfato de litio asciende a 97,2% y el margen del carbonato de litio a 87,8%. Mientras que el valor agregado de producir carbonato de litio (margen US\$32,500/ton LCE) es mayor que el valor agregado del sulfato de litio (margen US\$21,400/ton LCE)⁵. En consecuencia, existe un *trade off* entre rentabilidad y valor agregado.

⁵ Si bien no conocemos la descomposición de costos de ambos compuestos y, por ende, tampoco cuánto corresponde a bienes intermedios y cuánto a los factores primarios de producción, el margen entre ingresos y costos puede considerarse una medida de valor agregado (rentas + depreciación) de cada producto.

Referencias

Cabello, J. (2021). Lithium Brine Production, Reserves, Resources and Exploration in Chile: An Updated Review. *Ore Geology Review*.

Comisión Chilena del Cobre. (2023). *El mercado del litio: Desarrollo reciente y proyecciones al 2035*. Santiago de Chile.

Economic Commission for Latin America and the Caribbean. (2022). *Estudio económico de América Latina y el Caribe: Dinámica y desafíos de la inversión para impulsar una recuperación sostenible e inclusiva*. Santiago de Chile: UN ECLAC.

Espacio Público. (2024). *Litio: Recomendaciones para la gobernanza de salares en Chile*.

International Energy Agency. (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transition*. IEA.

International Energy Agency. (2023). *Critical Minerals Market Review*. IEA.

Jiménez, D., & Sáez, M. (2022). *Agregación de valor en la producción de compuestos de litio en la región del triángulo del litio*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Kelly, J., 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 & Recycling*, 174.

Pietrobelli, C., & Valverde, J. (2024). (Forthcoming) Avenues to Maximizing Value Added from Critical Minerals. In J. Jobet, & T. Moerenhout (Eds.), *Downstream Diversification in Mineral-Rich Countries*. Springer Nature.

Poveda Bonilla, R. (2020). *Estudio de caso sobre la gobernanza del litio en Chile*. CEPAL.

U.S Geological Service. (2024). *Mineral Commodity Summaries*.

Valverde, J., Menéndez, M., & Pietrobelli, C. (2023). Critical Minerals and Countries' Mining Competitiveness: An Estimate through Economic Complexity Techniques. *UNU MERIT Working Papers*, #2023-025.

Valverde-Carbonell, J., & Micco, A. (2024). Does the Energy Transition Open a Green Window of Opportunity in the Mineral Processing Industry? The Cases of the Copper and Lithium Industries. *MERIT Working Papers, United Nations University - Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology* (2024-005).

World Bank Group. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. WDC: World Bank Publications.

