

Feasibility technical-economic of the production of lithium hydroxide at small scale from brines

Catalina Velásquez Carrasco, Ingeniero Civil Industrial¹ and Victor Cabrera Álvarez, PhD Ingeniería ambiental.

Universidad Finis Terrae, Chile, catavelasquezcarrasco@gmail.com

Universidad Finis Terrae, Chile, victorcabrera27@gmail.com

Abstract– The electrification of our world is driving a strong increase in demand for lithium and lithium hydroxide, because is a vital raw material for the build-up currently available lithium-ion batteries. Currently approximately 60% of the world's production of lithium compounds is extracted from brines, a practice that evaporates water on average a million litres of brine per ton of LCE.

Due to that the present text is an investigation of a novel method to produce lithium hydroxide from brines in Atacama Desert, Chile.

This region presents particular desert climate conditions where water are scarce and to help solve this problem of the conventional production process, was developed and simulated a modified process, with an efficient consumption of water, to improve the environmental sustainability of the production plant.

It was found that the water consumption per kilogram of product was modified from one million litres of water per ton of LCE to 2596 litres and process cost is estimated to approximately 3 dollar per kilogram of LCE.

Finally it can be said that considering the environmental aspects, the corporate process for LiOH production is also mutually beneficial and the results presented can be considered as guidelines to address the optimization of the industrial process for obtaining the LiOH.

Keywords-- Lithium hydroxide, lithium, brines, Chile, electrolysis, water consumption.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.12>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Factibilidad técnico – económica de la producción de hidróxido de litio a pequeña escala a partir de salmueras

Catalina Velásquez Carrasco, Ingeniero Civil Industrial¹ and Victor Cabrera Álvarez, PhD Ingeniería ambiental.

¹Universidad Finis Terrae, Chile, catavelasquezcarrasco@gmail.com

²Universidad Finis Terrae, Chile, victorcabrera27@gmail.com

The electrification of our world is driving a strong increase in demand for lithium and lithium hydroxide, because is a vital raw material for the build-up currently available lithium-ion batteries. Currently approximately 60% of the world's production of lithium compounds is extracted from brines, a practice that evaporates water on average a million litres of brine per ton of LCE.

Due to that the present text is an investigation of a novel method to produce lithium hydroxide from brines in Atacama Desert, Chile.

This region presents particular desert climate conditions where water are scarce and to help solve this problem of the conventional production process, was developed and simulated a modified process, with an efficient consumption of water, to improve the environmental sustainability of the production plant.

It was found that the water consumption per kilogram of product was modified from one million litres of water per ton of LCE to 2596 litres and process cost is estimated to approximately 3 dollar per kilogram of LCE.

Finally it can be said that considering the environmental aspects, the corporate process for LiOH production is also mutually beneficial and the results presented can be considered as guidelines to address the optimization of the industrial process for obtaining the LiOH.

Keywords: Lithium hydroxide, lithium, brines, Chile, electrolysis, water consumption.

I. INTRODUCTION

El litio es un metal alcalino, blanco, ampliamente utilizado actualmente en el mundo, para diferentes aplicaciones y, por sus propiedades químicas, su importancia en el mundo es cada vez mayor. Su símbolo químico es Li y es el primer elemento del grupo IA de la tabla periódica, teniendo una masa atómica es de 6.94gr/mol. Es considerado un material fundamental, gracias a sus propiedades fisicoquímicas, dentro de las cuáles se destacan que es el metal sólido más ligero, inclusive teniendo una densidad equivalente a casi la mitad de la del agua, de 0,53gr/ml. Tiene un bajo punto de fusión y además es muy reactivo[1]. El núcleo de su átomo está constituido por tres protones y por tres o cuatro neutrones, posee además tres electrones orbitando alrededor del núcleo, dos en el nivel interno $n=1$ y uno en el externo $n=2$, es por ello que posee tendencia a perder ese electrón haciendo reactivo a su átomo. Este mineral es posible extraerlo desde diferentes reservas naturales, como las salmueras naturales, las pegmatitas, los pozos petrolíferos y el agua del mar. Cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo, sus electrones libres se desplazan dentro de la red cristalina con suma facilidad

pudiendo conseguir y transferir cargas negativas con poca resistencia, lo que le confiere las propiedades como conductor eléctrico. Chile mediante el salar de Atacama, Bolivia con el salar de Uyuni y Argentina a con del salar del Hombre Muerto, Rincón y Olaroz, concentran cerca del 85% de las reservas de litio en salmueras y el 50% de los recursos totales de litio. En estos tres países es posible encontrarlo en salmueras, donde se encuentran mezclados con otros tipos de minerales, que pueden ser aprovechados, tales como el potasio, sodio, boro, sulfatos y cloruros [2]. Las salmueras pueden explotarse con el método de evaporación eólico – solar el cual es el más económico de extracción de litio, lo que hace que este método sea enormemente atractivo en la industria.

En la Figura 1.1 se presentan las reservas y recursos de litio estimados, en los diferentes países. Éstos datos fueron obtenidos de Cochilco.

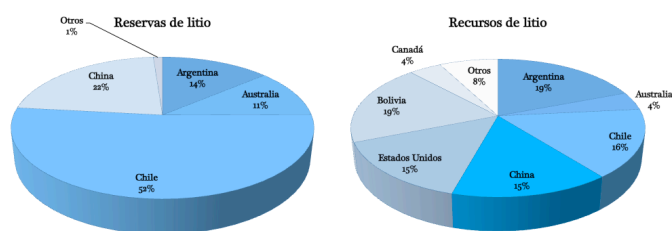


Figura 1. Reservas y Recursos de litio por país.

Fuente: Datos de Cochilco presentado en informe *mercado internacional del litio y su potencial en Chile*, 2017.

Se puede observar que Chile tiene las mayores reservas de litio en salmueras del mundo, que representan el 52% de las reservas totales de litio a nivel mundial [3], esto ha dado paso a que sea un actor fundamental y por ende es necesario aprovechar estos recursos naturales. Por otro lado, cuenta también con aproximadamente el 16% de los recursos mundiales del litio. La diferencia entre ambos es que las reservas son los recursos económicamente factibles.

La idea de realizar un informe acerca del litio tiene relación con la creciente demanda de este, su mercado creciente, las implicancias del desarrollo de la industria de la minería no metálica y, más precisamente, explicar cómo la explotación de este mineral se perfila en el continente, revisando los usos actuales del litio y su proceso de extracción. Las proyecciones crecientes de la demanda de LiOH, hacen necesario que Chile replantee como dinamizar la explotación de este recurso en forma sustentable, sobre todo con actores de pequeña escala. Es fundamental, entonces, dedicar esfuerzos que tiendan a

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.12>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

mejorar los procesos actuales al extraer este recurso desde salares en el Norte de Chile.

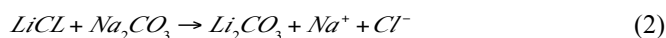
II. MÉTODO DE EXTRACCIÓN ACTUAL

La metodología que se utiliza actualmente para obtener hidróxido de litio a partir de salmueras en el norte de Chile, específicamente el salar de Atacama, consiste en lo siguiente: la salmuera es extraída desde el salar, la que luego se concentra en los estanques de evaporación, donde es depositada en dos etapas para eliminar las impurezas. En la primera etapa se precipita agua y además de otros compuestos, por ejemplo el cloruro de sodio, donde luego es llevada a la segunda etapa de concentración de salmuera mediante evaporación. La salmuera en este salar contiene aproximadamente 1,5 gr de litio por cada litro de salmuera, según la información del Sernageomin, que se detalla más adelante. Por lo tanto, conociendo que la densidad de este elemento es de 1,23gr/ml se calcula el porcentaje de litio en la salmuera contenida en el salar de Atacama:

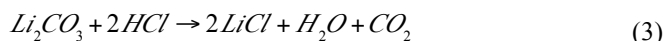
$$1,23 \frac{g}{mL} = \frac{1,5g}{x} \rightarrow x = 1,22g \frac{Li}{kg} \quad (1)$$

Lo que indica que existe 0.00122 gramos de litio por cada kilo de salmuera, lo que significa un 0,122% de concentración, cabe destacar que este elemento se encuentra formando el compuesto cloruro de litio.

Luego del proceso de evaporación, que dura aproximadamente un año, se logra llegar a concentrar el litio hasta los valores del orden de 4.5% a 5.5% Li, la salmuera purificada, se filtra para separar los sólidos suspendidos. El proceso posterior consiste en la producción de carbonato de litio, esto se hace en la planta química y consiste en la carbonatación, precipitación y secado de los cristales. Se añade a la solución carbonato de sodio y cal, con lo que es posible eliminar los restos de magnesio y calcio que quedan de la evaporación. La salmuera que queda reacciona con carbonato de sodio y se obtiene el carbonato de litio a través de la siguiente ecuación:



Una vez realizado todo ese proceso, es posible proceder a la reacción para la generación de hidróxido de litio o cloruro de litio, para lo cual existen las respectivas plantas, en las que se realizan estas reacciones. El cloruro de litio se produce mediante el agregado ácido clorhídrico al carbonato de litio, donde se obtiene:



Finalmente para el caso del hidróxido de litio se le debe agregar al carbonato de litio hidróxido de calcio, y la ecuación es la siguiente:



Con lo que finalmente el proceso concluye, pudiendo obtener mediante la extracción de salmuera desde el salar de Atacama, los tres compuestos de mayor interés de las industrias.

Durante el proceso que se ha explicado, se obtienen también sales de descarte, que no serán utilizadas, y que son acopiadas hidráulicamente en rumas de sal. Parte de esta salmuera es reinyectada de manera directa al salar y otra parte drena, de manera natural, hacia la napa recirculando al sistema. Sin embargo, el porcentaje de agua que se recupera es menor al 10% puesto que la gran mayoría se evapora y en todo este proceso por cada tonelada de mineral extraído se eliminan, vía evaporación, cerca de dos millones de litros de agua

III. METODOLOGÍA PROPUESTA

Existen una gran cantidad de procesos que se utilizan para separar sustancias con el objetivo de obtener como resultado sustancias más puras. En esta búsqueda se ha encontrado la electrólisis. Éste es un proceso químico que genera una reacción de oxidación-reducción, es la separación de elementos químicos por acción de la electricidad [29]. Es importante definirla claramente debido a que es la forma en la que se obtiene el litio de alta pureza, ya que este elemento no se encuentra libre en la naturaleza. La reacción que ocurre es la siguiente:



A continuación y con el objetivo de hacer mas simple el entendimiento del proceso que ocurre, en la Figura 2 se muestra la forma en la que se obtiene el litio puro a partir de cloruro de litio, mediante la electrólisis, en este caso se debe hacer pasar una corriente eléctrica mediante una batería con un cable conectado al lado positivo (ánodo) y otro al negativo (cátodo). Primero se prepara una solución salina que tenga un PH básico, por el tipo de reacción, luego se introduce el compuesto cloruro de litio a un vaso precipitado, luego se instalan ambos cátodos, uno selectivo a litio y otro selectivo a cloro. Mediante una reacción química que no es espontánea, las moléculas del litio serán atraídas al lado negativo y las moléculas de cloro al lado positivo, tal como si se simulara un imán y con este proceso químico se obtiene litio metálico puro y cloro gaseoso. También es interesante notar que en la electrólisis el ánodo es positivo y el cátodo es negativo.

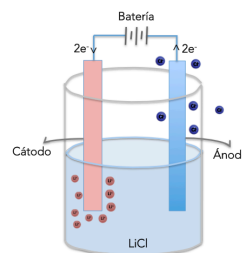


Figura 2. Electrólisis del cloruro litio

Una vez expuestas las principales bases en las cuales se fundamentará esta nueva metodología, se procederá a realizar el análisis correspondiente.

Con la electrólisis es posible obtener el elemento Li, que no se encuentra libre en la naturaleza, sin embargo, existe otro proceso que es de mucha relevancia también, debido a que con este se hace posible sustituir la evaporación, el cuál es la electrodiálisis. La metodología que se propone en este trabajo de investigación se basa justamente en ambas metodologías de separación. Consiste en utilizar una celda electroquímica con dos electrodos, uno selectivo a aniones, el otro selectivo a cationes, además serán instaladas también membranas de intercambio de iones. La salmuera, que contiene cloruro de sodio, potasio, magnesio, sulfuro, cloruro de litio, boro, entre otros elementos y compuestos, se introduce a la celda química y por efecto de la corriente eléctrica que será suministrada, los iones son atraídos hacia los electrodos correspondiente. Las membranas de intercambio solo permiten el paso de iones con los que son afines, debido a este fenómeno se generan dos tipos de soluciones, una que está desmineralizada y la otra que está concentrada. Gracias al fenómeno que ocurre, en la solución concentrada también aumenta la concentración de litio, esto es justamente lo que se se realiza con el proceso físico de la evaporación, es por ello que la electrodiálisis permitiría reemplazarla.

En esta primera etapa lo que se rescatará será la solución concentrada y lo demás será devuelto a la salmuera. De manera que quede representado de manera clara a continuación en la Figura 3 se presenta la imagen de cómo trabaja la electrodiálisis.

La segunda etapa de este proceso continuaría con la solución desmineralizada que es devuelta a la salmuera y se continúa el tratamiento con la salmuera concentrada. Para esto, se utiliza también un reactor electroquímico, esta vez con dos electrodos, uno selectivo a iones de litio y el otro selectivo a iones cloruro, donde es extraído el litio puro por efecto de electrólisis, el que se adhiere al electrodo por electrodeposición.

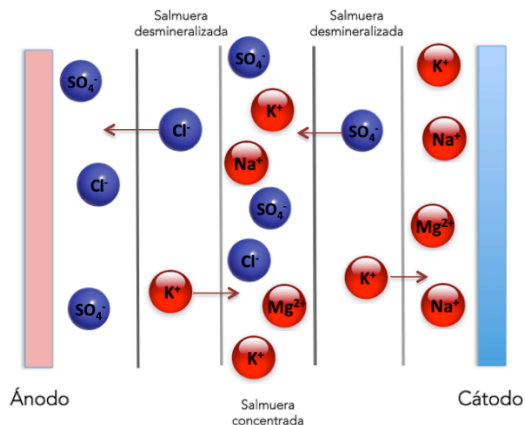


Figura 3. Proceso de concentración de salmuera mediante electrodiálisis.

La electrodeposición será el método mediante el cual se depositará el metal litio sobre la superficie conductora del electrodo selectivo a litio. En esta etapa, el cloro es producido como subproducto, en este sentido es importante tener en cuenta que una de las formas de producir Cloro es mediante la electrólisis, sin embargo su transporte, almacenamiento, manipulación y uso presenta una serie de inconvenientes, debido a su alta toxicidad obliga a establecer importantes sistemas de seguridad para prevenir intoxicaciones en caso de fugas. Es por ello que al producirse como subproducto, es importante considerar estos niveles de seguridad, sin embargo, hay que tener presente que posiblemente con este método, será posible también obtener cloro. El litio adherido se extrae del electrodo en estado sólido. El potencial electroquímico de las ecuaciones, a presión y temperatura constante (ambiente), se mostrarán a continuación para cada ecuación:



La ecuación de Energía de Gibbs indica la espontaneidad para una reacción química. Para que se dé esta condición de espontaneidad ΔG debe ser mayor a cero. En caso contrario el proceso no es espontáneo.

$$\Delta G = -n\Delta E \quad (7)$$

donde:

- n : número de electrones recibidos y transferidos
- ΔE : potencial electroquímico

Reemplazando se obtiene:

$$\Delta G = 17.64 \quad (8)$$

Debido a que la diferencia de potencial es positiva, la reacción anterior para la separación del cloruro de litio no es espontánea, por lo que es necesario utilizar celdas electroquímicas y agregar 4.41 V para que la reacción pueda ocurrir, los cuales se agregan mediante electricidad. Cabe considerar, también, que es fundamental la utilización de un electrodo selectivo a litio y otro selectivo a cloruro para que acepte la cantidad de voltaje requerido. Con esta segunda etapa de la metodología propuesta se ha obtenido litio puro, por lo que se prosigue con el proceso de obtención de hidróxido de litio.

Como el litio pertenece al grupo I de la tabla periódica, es un metal alcalino muy reactivo, y al combinarse con agua, es posible formar hidróxido de litio junto con el gas hidrógeno, de acuerdo a:



La ecuación anterior es necesario balancearla, quedando:



En este caso, el hidrógeno es producido como subproducto, por lo que se hace necesario tener en cuenta que, en presencia de aire, debe manejarse con mucha precaución, debido a que el oxígeno es un comburente con el cuál el hidrógeno tiene gran afinidad. Ambos se combinan en frío muy lentamente, pero en presencia de una llama o de una

chispa eléctrica lo hacen casi instantáneamente, y además acompañado de explosión [14]. Como este elemento no se requerirá en los pasos posteriores, será eliminado, almacenándolo en tanques de hidrógeno. Si mediante este procedimiento existiera una fuga o algún otro tipo de problemas relacionados, no supondría un gran problema, ya que en condiciones normales el H_2 junto con el O_2 forman vapor de agua. Además, el hidrógeno existe naturalmente en la atmósfera, y por lo tanto, el gas se disipará rápidamente en áreas bien ventiladas. En el único caso en el que esto puede ser riesgoso, sería en presencia de llama o chispa eléctrica, tal como se indicó en un comienzo. En la ecuación balanceada de la combinación de litio puro y agua, se obtiene entonces el compuesto buscado: hidróxido de litio, y además se libera hidrógeno a la atmósfera. Esta reacción se da en condiciones de temperatura y presión normales. Se observa además de la reacción, que teóricamente serán requeridos 2 moles de agua por cada 2 moles de litio que se hagan reaccionar, de lo cual se obtendrán 2 moles de hidróxido de litio y 1 mol de hidrógeno. De acá se puede calcular cuantos litros de agua se necesitarán por cada tonelada de litio producida:

- Masa molar Li: 6.941 g/mol
- Masa molar del H_2O : 18.02 g/mol
 - Masa molar del hidrógeno diatómica: 2.02 g/mol
 - Masa molar del oxígeno diatómico: 16.00 g/mol
- Masa molar del hidrógeno diatómico: 2.02 g/mol
- Masa de litio producida: 1.000 g
- Densidad del H_2O : 1.00 kg/L

En primer lugar se necesita saber cuántos moles de litio son 1000 kilogramos:

$$1000000 \times \frac{1 \text{ mol}}{6.941 \text{ g}} = 144071.46 \text{ moles} \quad (11)$$

Por cada mol de litio se necesita un mol de agua. Por lo tanto, por cada tonelada de litio se necesitarán 144071,46 moles de agua, lo que en gramos sería. O lo que sería equivalente a decir 2596 kg. La densidad del agua es 1kg/l. Por lo tanto, son necesarios 2596 litros de agua por cada tonelada de litio producido. Al contrastarlo con la metodología actual en la que, por cada tonelada de mineral se eliminan, vía evaporación, cerca de dos millones de litros de agua, se evidencia la disminución del impacto ambiental que genera la producción de hidróxido de litio a través de la electrodialisis. Continuando con el proceso, en la primera etapa fue obtenido el litio puro, en la segunda etapa se le hidrata agregando agua, por lo que el paso final, como la reacción no tiene un 100% de eficiencia, esta es filtrada para eliminar las impurezas y finalmente obtener el hidróxido de litio. En la Figura 4 se observa la imagen que muestra todo el proceso, desde que se obtiene la salmuera hasta finalmente llega al hidróxido de litio.

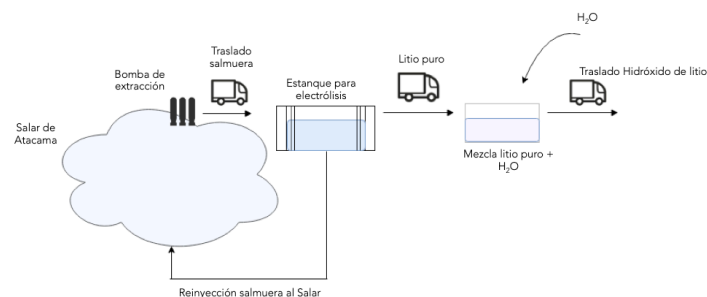


Figura 4. Proceso de obtención de hidróxido de litio

En resumen, el proceso que se está proponiendo en este trabajo es el siguiente: el proceso se debe iniciar con una perforación de un pozo en el salar para encontrar los depósitos de salmuera a una profundidad de aproximadamente 30 metro, la cual es posible extraerla por sistema de bombeo. Luego la salmuera, en vez de pasar por pozas de evaporación, es vertida a un reactor - estanque, donde tiene un electrodo afin con los aniones y otro con los cationes. Este se extrae y finalmente, gracias a la reacción que se genera al agregar agua pura, es posible obtener el hidróxido de litio. La aplicación de la producción de hidróxido de litio a partir de salmuera se basa en una estructura metodológica definida, clara y general como para ser desarrollada en diversos yacimientos, tanto en la minería a pequeña escala, que es en lo que se enfocará el trabajo, como en la minería a gran escala y es una metodología limpia ya que no se requieren de reactivos químicos.

Los materiales que se deben utilizar para la construcción del sistema completo dentro de una minera que aplicaría esta solución. En primer lugar, será requerida la construcción de un estanque, que cumplirá la función de ser una celda electrolítica donde se almacenen la salmuera que será sometida a electrodialisis dentro del mismo. Para poder realizar este proceso, es necesario tener en cuenta qué materiales se necesitaran, y de esta forma considerarlo también dentro de la inversión inicial. Para el caso, serán requeridas membranas catiónicas y aniónicas. En este tipo, la separación es consecuencia de la carga de la membrana, siendo excluidos aquellos componentes cuya carga sea la misma que la de la membrana.

Se debe ubicar un cátodo y un ánodo en cada extremo de la celda, por lo que resulta imperativo utilizar un material metálico, ya que estos son buenos conductores del calor y de la electricidad, son sólidos en temperaturas normales, a excepción del mercurio, además son maleables, lo que permite que se extiendan para formar láminas o planchas [4], que son las que se utilizarán para las membranas. En este caso, se utilizará el metal Cobre (Cu) por ser un buen conductor de electricidad, además de ser resistente al óxido y tener gran resistencia a la corrosión [5], con lo que se evitarían ciertos problemas que pudieran presentarse dentro del estanque.

Será requerido también un agitador, ya que debe provocarse una turbulencia para incrementar la remoción de sales con un número de Reynolds lo más alto posible. Para esto se utilizará un motor que sea para un envase de 5000 a 8000 litros que tiene una potencia de 160kW o 215 HP, además de una salida de flujo diluido, una salida de flujo concentrado, una salida de flujo para recirculación y una entrada de flujo de salmuera, y una batería o fuente reguladora. Finalmente se necesitará un motor para la salida de salmuera diluida, ya que se deberá llevar de vuelta al Salar. A continuación es posible observar en la figura 4 una imagen que muestra la forma en la que será instalada la planta.

La potencia eléctrica, que representa uno de los mayores costos, es proporcional al voltaje multiplicado por la intensidad, aun manteniendo 1[A], por ello el caudal es muy importante. Hay que tener en cuenta también que siempre, en cualquier tipo de procesos, el rendimiento se ve disminuido por ciertos factores. Es por ello que se considerará un rendimiento del sistema de un 95%, donde las pérdidas son bajas y casi toda la corriente hará su trabajo.

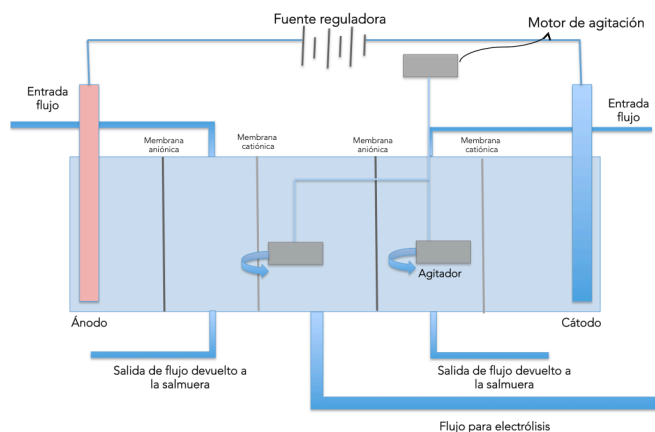


Figura 5. Diseño fuente electrolítica de concentración de salmuera mediante electrodiálisis

IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el procedimiento experimental se utilizó la técnica de la electrolisis donde por precipitación selectiva se obtuvo el litio puro. En la solución de cloruro de litio, el metal ya está en la solución y solamente se trata de recuperarlo depositándolo en el cátodo. Para conocer de forma teórica, la cantidad de litio que será posible obtener, se utilizarán las leyes de Faraday. . Esta plantea que:

- La cantidad depositada de una sustancia, es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa.
- Las cantidades de sustancia depositada, son proporcionales a su peso químico.

Y con esos postulados se llega a la siguiente ecuación:

$$M_d = \frac{mm \cdot i \cdot A_t \cdot t \cdot \eta}{z \cdot \mu} \quad (12)$$

donde, Md: masa depositada, mm: masa molar del elemento, i: densidad de la corriente, At: área total expuesta a deposición, t: tiempo, n: eficiencia de la corriente, z: número de electrones intercambiados, f: constante de Faraday

Estos datos fueron obtenidos tanto desde la bibliografía disponible como de los materiales que se tuvieron que utilizar en la experimentación. Para calcular la densidad de la corriente el área de la sección nominal del cable de cobre era de 10cm^2 , dato con el que se consultó en tabla el valor correspondiente. El área total expuesta fue medida con una regla al momento del experimento. El tiempo fue definido previamente. La eficiencia de la corriente eléctrica, por convención, se considera entre valores de un 90% a un 94%, es por ello que se consideró el promedio. El número de electrones es posible conocerlo en la ecuación que representa la reacción generada y la constante de Faraday es un valor conocido y está relacionada con el número de Avogadro y la magnitud de la carga eléctrica del electrón. De forma teórica, manteniendo 4 horas el proceso, se depositarán 0.01 gramos de litio. Ahora entonces, se procede a explicar el procedimiento experimental, y se observará que ocurre en la realidad. Para ello, los materiales que se utilizaron son los siguientes: vaso precipitado, batería, 50 gr de cloruro de litio, 5 gr de soda NaOH, agua, pinzas lagarto, electrodos de cobre, pesa, cronómetro. Para realizar el experimento, primero se prepararon y masaron los 50 gramos de cloruro de litio y los 5 gramos de soda NaOH, esta última se utiliza para basificar la disolución, debido a que no es una reacción espontánea. En las figuras 5 y 6 se muestra el procedimiento para la obtención de litio.

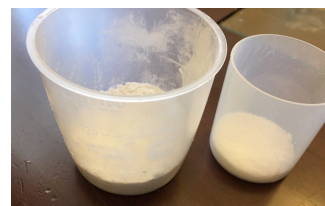


Figura 6. Cloruro de litio – Hidróxido de sodio.

Ambos compuestos se mezclaron en un vaso precipitado agregándole 100 ml de agua. Luego se instalaron dos electrodos de grafito conectados a un generador de corriente. Se dejó instalado el sistema durante cuatro horas, tiempo en el cual se había calculado que se depositarían 0.01 gramos de litio en el electrodo. Sin embargo luego de una hora de experimento fue posible observar como en el cátodo ya comenzaba a acumular el litio en él. Por otro lado, como el cloro se obtiene de forma gaseosa, no se deposita en el ánodo, sino que se sintió su fuerte olor en el ambiente. Debido a que la cantidad de litio depositado era muy poca como para que

fuera masada, solo se dejó para comprobar que el procedimiento de electrólisis del cloruro de litio es un proceso factible para producir hidróxido de litio.

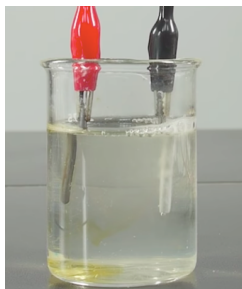


Figura 7. Obtención de litio puro

V. EVALUACIÓN TÉCNICA

Análisis Interno: Metodología Cadena de valor

A continuación, se presenta la cadena de valor de la empresa en estudio de este trabajo, la cuál permite examinar las actividades de esta minera, sus procesos y como interactúa con las demás actividades, para ello éstas últimas serán divididas en actividades primarias y de apoyo.

Actividades primarias

- a) Logística de entrada: para potenciar la logística de entrada y con el objetivo de cumplir con el abastecimiento de los productos, en el momento preciso, se generará una relación con los proveedores. A través de la comunicación continua, para poder atender los problemas en el instante en que se generan o lo más pronto posible.
- b) Operaciones: en las operaciones, para cumplir con todo lo que la empresa propone, como la calidad, la producción, la responsabilidad de entregar los compuestos a tiempo, se realizarán esfuerzos diarios. Ésto incluye realizar controles de calidad de manera constante, se deben cumplir con los estándares exigidos por los clientes. Además, se les ofrecerá a los empleados contratos de forma indefinida y se les realizará capacitaciones constantes.
- c) Logística de salida: la logística de salida también es un punto muy importante, debido a que como las empresas que utilizan estos compuestos son extranjeras, se necesita conocimiento total en las condiciones que existen para realizar exportaciones, para ello se le realizarán capacitaciones a la persona encargada para que esté enfocada al proceso de internacionalización.

- d) Marketing y Ventas: así como todas las empresas de diferentes industrias, la minería también requiere de marketing, sin embargo, éste debe ser más estratégico, en este sentido las acciones que se realizarán para dar a conocer la marca y/o empresa, estarán enfocadas a los beneficios que esta posee. Las ventas y contactos previos con clientes las realizará personal especializado, que haya hecho capacitaciones previamente y que conozca de manera transversal como funciona todo el proceso de producción.
- e) Servicios Post-Ventas: el servicio post venta es enfocado tanto a asegurar la calidad de los productos que se venden, como también a el servicio que se tiene con las comunidades luego de cada mes de producción. En este sentido en primer lugar será importante asegurarse de que el producto llegue en el momento indicado, además de que siempre tenga el porcentaje de pureza prometido.

Actividades de apoyo

- a) Infraestructura: la infraestructura que tendrá esta empresa será de alta calidad y se asegurará de que la perturbación del terreno sea la mínima, para que no se afecte a las comunidades del sector, así como tampoco a la flora y fauna. Algo que apoya a que la perturbación del terreno sea mínima es seleccionar la técnica minera de producción adecuada, en este caso será la electrodialisis, por lo que solo se necesitará espacio para realizar una sala de máquinas donde se llevará a cabo la reacción.
- b) Recursos Humanos: para la gestión humana, como es una empresa que no tiene amplia experiencia en el sector, se realizarán capacitaciones al personal, se les ofrecerá un trabajo estable de manera de tratar de evitar complicaciones por la poca experiencia que se tiene en el rubro.
- c) Desarrollo tecnológico: en términos de desarrollo tecnológico, la nueva técnica representa un avance en relación a la actualidad, debido a variadas razones, permite que los recursos mineros se utilicen eficientemente, al devolver el líquido restante (elementos que no han sido usados en el proceso) a la salmuera.
- d) Adquisiciones: en adquisiciones, claramente para el desarrollo de la minera es necesario invertir en activos que permitan realizar por ejemplo análisis químicos constantes, realizar una producción continua y en lo posible automatizada, entre otras.

Resumiendo, la cadena de valor es presentada a continuación de forma detallada, con cada una de sus variables importantes, como se observa en la Figura 8.

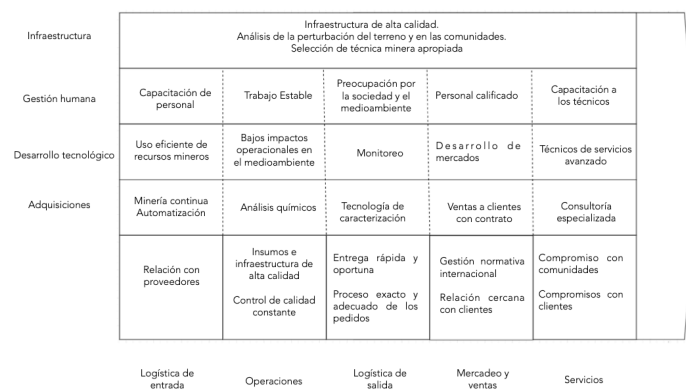


Figura 8. Cadena de valor.

Análisis Externo: metodología Cinco Fuerzas de PORTER

Poder de negociación con clientes

Número de compradores significativos: el consumo mundial el año 2017 fue de 230.000 toneladas métricas. En el futuro se espera que esta demanda vaya en aumento a tasas crecientes, por lo tanto, el número de compradores significativos es alto.

Disponibilidad de sustitutos: en este segmento se puede distinguir que en general por las características que posee el hidróxido de litio como electrolito para baterías, no existen sustitutos importantes.

Costo de cambio del comprador: actualmente el hidróxido de litio es el compuesto que lidera la demanda mundial para la producción de baterías portátiles, esto es a razón de que tiene unas propiedades únicas dentro de los compuestos

Amenaza de compradores de integrarse hacia atrás: ésta opción de lo compradores es mínima ya que para poder producir los compuestos del litio se necesita, primeramente, residir en un lugar donde se produzca, tener los permisos necesarios de parte del estado para producirlos, una alta inversión inicial y ser dueños de los recursos del mineral.

Rivalidad entre las empresas

Crecimiento de la industria: el crecimiento de la industria ha sido proporcional al aumento en la demanda de los compuestos del litio que ha tenido un gran cambio en los últimos años y, se espera que este aumento continúe a razón de 17% anual hasta el año 2050. Lo que hace que se presenten grandes cifras económicas en esta industria.

Influencias de los costos fijos en el valor final: el costo más importante en el que se debe incurrir para que esta empresa se pueda desarrollar es la inversión inicial. Una vez que la empresa se consolide, los costos fijos que se deben pagar cada mes son los sueldos principalmente y que al ser una empresa pequeña se encuentran bien regulados, por lo que al respecto es posible concluir que el impacto que tienen los costos fijos en el valor final del mineral no es significativo.

Grado de diferenciación: en este caso no existe un alto grado de diferenciación entre las empresas productoras.

Concentración y equilibrio de competidores: para una empresa a pequeña escala que quiera incursionar en el sector y comenzar a producir hidróxido de litio a partir de salmueras existen dos grandes competidores que explotan litio en Chile actualmente, gracias a la concesión que les otorgó CORFO, las cuáles son SQM, filial de Soquimich y SCL Rock Wood, antiguamente Sociedad Chilena del Litio. Ambos explotan litio a gran escala y dominan el mercado mundial.

Identidad de la marca: la marca que produce hidróxido de litio no debiera representar mayor relevancia, ya que al momento de que los clientes acceden a estos productos lo más importante es la pureza de este.

Costo de cambio de clientes: en este punto es importante señalar que el costo de cambio para los clientes es bajo, debido a que no existe perjuicio económico por este cambio, sin embargo, existen pocas empresas que ofrecen este producto, por lo que no hay muchas opciones para escoger.

Amenaza de nuevos entrantes

Economía de escala: la economía de escala en esta industria es un factor relevante, debido a que mientras mayor es la producción de hidróxido de litio menor es el costo de producirlo, una vez que ya el proceso se encuentra estandarizado.

Identificación de la marca: la empresa fabricante no reviste mayor relevancia, ya que al momento de que los clientes acceden a estos productos consideran importante la pureza de estos, por sobre la marca que los produce.

Acceso a canales de distribución: una vez obtenido los permisos se hace posible comenzar con la operación, y los canales de acceso son establecidos una vez que se haga un acuerdo con los clientes, debido a que se negocia directamente con ellos. En general actualmente la distribución se realiza mediante embarcaciones.

Requerimientos de capital: se ha mencionado a lo largo de este informe que la principal razón por la que una empresa de minería a pequeña o mediana escala no produce compuestos de litio es debido a la alta inversión inicial que requiere para iniciar la operación y que esta es la gran barrera de entrada que se está tratando de derivar con esta nueva metodología de producción.

Experiencia y efectos de aprendizaje: para la producción de compuestos de litio, los conocimientos que se deben tener son muy técnicos, es por ello que se hace necesario la realización de, por ejemplo, laboratorios, donde se estén en constante experimentación, para ver de qué forma se puede obtener mayor pureza, mejor producción, etc.

Regulación de la industria: en el caso particular de Chile existe legislación referente al tema en estudio, es necesario realizar tramitaciones para poder comenzar a operar.

Alianza entre competidores: este punto no tiene mayor relevancia en esa industria, debido a que no existe una alianza entre los competidores que existen actualmente. Por lo que su

implicancia en las características de la industria externa es bajo.

Costos de salida: debido a la alta inversión inicial que se requiere, los costos de salida serán también bastantes altos. Además, dentro de este ítem se debe considerar el Costo de Cierre de la faena, el cual es exigido por ley, y que consiste en tener un plan de cierre que controle los riesgos.

Restricciones gubernamentales: estas van a existir con relación al tipo de gobierno y modelo económico que tenga el país. En Chile, se opera en el libre mercado, sin embargo al ser una industria minera, en la cual los recursos son limitados, existen restricciones gubernamentales, ya que para producir se deben pasar una serie de pasos previos, tales como someterse al Servicio de Evaluación Ambiental mediante un estudio y posterior informe de Declaración de Impacto Ambiental debido a los efectos adversos que tienen estas empresas en los recursos naturales.

Poder de negociación con proveedores

Disponibilidad de sustitutos para los productos o servicios de los proveedores: se puede establecer claramente la gran disponibilidad de sustitutos para las diferentes herramientas que se proveen a la industria para la operación.

Costo de cambio de los productos o servicios de los proveedores: la empresa opera en el libre mercado y va a depender del beneficio que le otorga cada proveedor, puesto que se analizará el valor de cada oferta y en base a esto se va a decidir por la que más convenga atendida la calidad y el precio del producto a ofrecer.

Amenaza de integración hacia delante de los proveedores: es altamente improbable que un solo proveedor pueda desarrollar en toda su magnitud lo que se requiere para producir hidróxido de litio, ya que él no tiene acceso directo a los distintos proveedores a los que se deben recurrir.

Contribución de los proveedores a la calidad: los activos que se necesitan incluyen camiones, bombas, estanques, camionetas etc. y además productos como implementos de seguridad, petróleo, entre otros similares, para los que se necesita tener una calidad estándar que en la industria se cumple en prácticamente todos los proveedores. Atendida esa calidad, es posible realizar la operación sin problema.

Número de proveedores de importancia: al existir variedades de proveedores en distintas áreas se diluye la importancia clave de estos. Sin perjuicio de que la empresa puede buscar a un proveedor específico para cierta área, sin embargo, sería un caso excepcional.

Amenaza de productos sustitutos

Disponibilidad de sustitutos cercanos: esta posibilidad va cambiando dependiendo de los materiales en estudio, por ejemplo, los implementos de seguridad no es posible sustituirlos, ya que por regulación y seguridad no pueden ser reemplazados.

Costo de cambios para el cliente: en este punto se puede consignar, que para los clientes no tendrá mayor costo el

cambiarse de empresa o producto, debido a que los precios que se tranzan son relativamente constantes entre las empresas oferentes.

Agresividad de los productos sustitutos: está íntimamente relacionada con el precio y calidad de los mismos, ya que, si aparece un compuesto de litio con una calidad adecuada para ser comercializada, pero con un precio mucho más económico, estos indudablemente los preferirán.

Relación valor – precio del sustituto: como se ha comentado en puntos anteriores, la relación valor - precio de los sustitutos no es suficiente para que las empresas que hoy compran compuestos de litio lo sustituyan, debido a que las características de este metal son únicas y no existe otro compuesto que pueda reemplazarlo.

Por lo tanto, tras analizar todos los puntos que involucran a la industria de la minería del litio, se puede finalmente establecer que la atractividad de industria es media, ya que el crecimiento que presenta esta industria es muy favorable, además de que no existen importantes sustitutos. Sin embargo, el gran conocimiento que se requiere en la creación de una nueva empresa, además de las barreras de regulación que se necesitan provoca que el resultado del análisis no sea Alto.

VI. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Ingresos: el litio es uno de los metales que ha tenido mejor performance en términos económicos durante los últimos años. Esto se ve evidenciado y lo corroboran las fuertes alzas que han tenido los precios de estos compuestos, tanto el carbonato de litio como el hidróxido de litio. Esto es de utilidad conocerlo para realizar la evaluación económica, en la cual se preverán las alzas para los próximos quince años, que será el periodo en el que se realizará el flujo de caja de esta nueva empresa. Cabe destacar que, si bien es cierto ambos compuestos, tanto el carbonato como el hidróxido de litio han aumentado sus precios en el mercado, el primero se ha transado el presente año con un valor entre los US\$5.952 y US\$6.614 por tonelada, en cambio el hidróxido de litio ha alcanzado precios que llegan a superar las US\$14.000 por tonelada en el 2018 [12]. Es por ello también que se le ha dado una gran relevancia durante el desarrollo de esta investigación. Es importante mencionar también que como es una minera a pequeña escala, la producción máxima de carbonato de litio equivalente (LCE) será de unas 5000 toneladas anuales. Para convertir de carbonato de litio a hidróxido de litio, se debe multiplicar por 0.648, que es el valor de conversión entre compuestos [12]. Por lo tanto, producir 5000 toneladas de LCE es equivalente a producir 3240 toneladas de hidróxido de litio. La producción máxima se logrará recién al año 3 de operación, de manera progresiva (ramp-up). Además durante el primer año no existirá producción, debido a que será el periodo de tiempo en el que se realizarán todas las instalaciones requeridas para partir.

A continuación se presenta en la Figura 9 un resumen de la producción esperada durante los 15 años de operación, en toneladas de hidróxido de litio mensual, donde se pueden

observar ciertos puntos de producción con el objetivo de ver como esta va aumentando a medida que pasan los meses y la máxima producción se alcanza desde año tres en adelante, produciendo 270 toneladas de hidróxido de litio mensual, o lo que es equivalente a 3240 toneladas de LiOH anuales

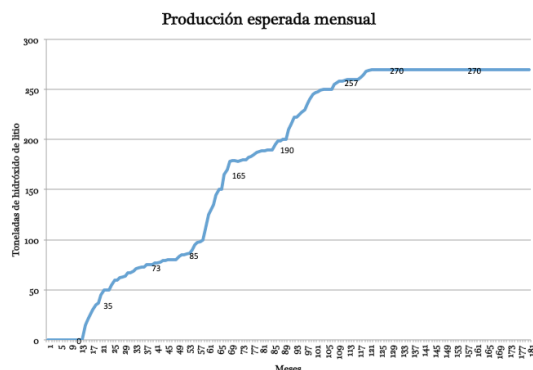


Figura 9. Producción esperada mensual de hidróxido de litio.

Costos: La proporción de los costos que poseerá la empresa se fundamenta con pruebas realizadas en el salar de Maricunga, en el Norte de Chile [11]. Los costos directos para la producción son US\$4000/ton de LiOH, y su proporción es la siguiente:

Costos directos:

- Mano de obra: 25%
- Electricidad: 40%
- Reactivos: 10%
- Petróleo y materiales: 10%
- Mantenimiento y reparación: 10%
- Flete terrestre a puerto chileno: 5%

Gastos generales:

- Mano de obra: se requieren 18 trabajadores, y lo que se debe desembolsar por concepto de sus sueldos será de US\$29.539 mensualmente. Cabe destacar que estos sueldos serán reajustados anualmente en base al IPC.
- Implementos de seguridad: suman un total de US\$173 por cada trabajador de la empresa, es decir US\$3114 en total, estos serán renovados cada seis meses.
- Transporte de personal: US\$770 mensualmente

El informe financiero desarrollado en base a los datos expuestos fue el flujo de caja para conocer la liquidez que tendrá el negocio en el futuro, además, a partir de este se obtendrá el VAN, el TIR y el ROI, que en su conjunto permitirán concluir la factibilidad económica. A comienzos del primer año de operación existe una fuerte baja en las utilidades, la razón es que es aquí donde se hace la compra de todos los activos que se necesitarán, tales como camiones, camionetas, bombas, entre otros, además de que los ingresos del negocio son únicamente por la venta del hidróxido de litio, y esta producción no comenzará siendo en el primer año del máximo permitido, porque se requiere de un periodo previo que permita instalar a la empresa en el mercado, para luego

alcanzar esta máxima producción Sin embargo, como es una minera y el precio del hidróxido de litio en el mercado es bastante competitivo, se logra salir rápidamente de estas utilidades negativas. Es por ello que del año 1 al año 2, los ingresos aumentan en un 370%, y al año 3 aumentan un 14%, porque ya comienzan a estabilizarse. A continuación se presenta la Figura 10, que muestra las utilidades en el tiempo que se esperan obtener, expresadas en miles de dólares.

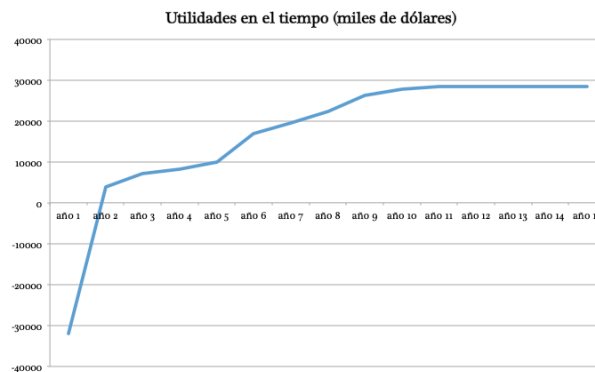


Figura 10. Utilidades en el tiempo (en miles de dólares)

CAPEX inicial: se requieren de aproximadamente US\$10000 por tonelada de producto LiOH, por lo tanto, si se espera una producción máxima de 3240 son requeridos US\$32.000.000 para comenzar con la operación. A partir de las estimaciones de las utilidades en el tiempo se calcula el VAN Y TIR. Para calcular el VAN se ha considerado una tasa de descuento del 15% con lo que se obtiene un valor actual neto de \$77.723.004. El TIR para los quince años de operación es de un 43%, es decir, este valor indica que los porcentajes consecutivos al recién descrito, representan flujos de dinero negativos, sin embargo con el valor de 43% se comprueba que es un negocio rentable para la inversión.

Con los datos expuesto con anterioridad, fue calculado el ROI.

$$ROI = \frac{\text{Beneficio} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} = \frac{77.723.004 - 32.000.000}{32.000.000} = 1,4 \quad (13)$$

Como es positivo y mayor que uno, esto indica que el proyecto es rentable y por cada peso invertido se obtendrá un retorno de aproximadamente 1.4 pesos.

VI. CONCLUSIÓN

Como se ha mencionado latamente en este estudio, el litio es un mineral cada vez más importante. La proyección que tiene este mineral en su aplicación a las nuevas tecnologías, lo hacen un recurso valioso y de cada vez mayor interés y Chile tiene un papel fundamental en este mercado, ya que es uno de los países con mayores reservas de litio en el mundo y con una buena gestión permitirá aumentar las inversiones mineras e ingresos para el país, incluso pudiendo alcanzar valores de exportación similares a la de otros sectores en los que Chile se destaca internacionalmente. Durante el desarrollo de esta

investigación, se exploró las principales dificultades de los métodos de extracción de compuestos de litio que son utilizados actualmente de manera que la nueva metodología planteada para obtener hidróxido de litio evita que sea necesario pasar por el proceso de obtención de carbonato de litio previamente que hace que los costos aumenten. Esta metodología consistió en concentrar el litio que se encuentra en las salmueras y eliminar las impurezas a través de la electrodiálisis. Para ello se utiliza un celda electroquímica con dos electrodos, uno de ellos selectivo a iones litio y otro selectivo a iones de cloruro, de esta manera se obtiene litio puro, el que luego combinado con agua para producir hidróxido de litio. El proceso de la electrodiálisis permite optimizar recursos en la industria y el diseño del modelo de la celda de electrodiálisis presentado abarca algunos de los fenómenos fundamentales que ocurren en la mecánica de fluidos y la electricidad, con el objetivo de llevar esto a los costos que significaba construir esta celda. Si bien es cierto la literatura de la electrodiálisis no es muy extensa debido a que en la actualidad es una tecnología aún en fase de desarrollo para producir litio, es de creciente interés, es por ello que este trabajo buscó ser un aporte en la aplicación de estas nuevas tecnologías en un campo completamente nuevo. Los beneficios que se pueden obtener de esta nueva metodología son múltiples, partiendo porque es una metodología innovadora, que permite a las empresas de pequeña escala extraer hidróxido de litio a partir de salmueras, además mencionando que esto tiene un impacto ambiental mucho menor a las pozas de evaporación, ofrece un claro beneficio a la población de alrededores del desierto de Atacama, ya que ésta es una región que tiene un importante estrés hídrico, y esto permite cuidar este recurso, además de cuidar la flora y fauna existente en el lugar por lo que no supone una amenaza tan grave para el medio ambiente.

Al término de esta memoria se ha llegado a las siguientes conclusiones más relevantes sobre vía propuesta:

Los costos de inversión inicial que tiene la producción de litio a partir de salmuera, alcanza valores de US\$200000000, en cambio a través de electrodiálisis, es posible producir inicialmente con menores costos y además con menor impacto al medio ambiente, siendo una reacionalización de la producción.

Se minimiza el riesgo de tener dos grandes empresas que dominen todo el mercado local y que puedan tener fallas, dividiendo la producción en pequeñas empresas, lo que aumenta la flexibilidad del mercado.

Es más factible conectar pequeñas empresas en una cadena de suministro para los compradores, se puede superar el problema de la estacionalidad, lo cual podría abrir un nuevo negocio de producción de baterías en Chile.

Si esta metodología se llegase a implementar y se considerara que 20 empresas pequeñas comiencen a invertir y producir cada una 5000 toneladas de LCE, serían capaces de producir en la actualidad la mitad del consumo anual de LCE en el mundo, con lo que benefician también la competitividad de Chile en los mercados internacionales.

Se pueden beneficiar directamente a empresas pequeñas que buscan una opción económicamente factible en la industria de la minería no metálica y sin ser una amenaza para el medio ambiente.

REFERENCES

- [1] R. Briones, H. Bosselin, G. Gutiérrez & J. Zagal, 'El litio, mineral estratégico para la energía en Chile y el mundo', *elmostrados*, Diciembre 2017
- [2] C. Lagos, 'Antecedentes para una política pública en minerales estratégicos: Litio', Cochilco, Atacama, Chile. Inf. Inv. Diciembre 2019.
- [3] I. Garcés, 'La industria del litio en Chile', Depto. De Ingeniería. Universidad de Antofagasta..
- [4] F. Villalobos. '¿Por qué Argentina podría desplazar a Chile como el primer productor de litio del mundo?', *Emol*, vol. 12, pp. 6-7, Marzo 2017.
- [5] A. Manrique, 'Explotación del Litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina', 1ª ed. Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, 2015.
- [6] COCHILCO (Comisión Chilena del Cobre) . Dirección de Estudios y Políticas Públicas. "Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio (DE/12/09)
- [7] J. Díaz & D. Tapia. 'Procedimiento de extracción de litio para la obtención de carbonato de litio, desde una salmuera o mineral y/o arcilla previamente tratado para estar libre de boro', *Iholdi minerales*, Atacama, Chile, Inf. Inv. 2013.
- [8] L. Gravel, litio y las dificultades para la obtención de una calificación ambiental. Tesis. Universidad de Chile. 2015, Santiago, Chile.
- [9] Ministerio de minería, (2018, Mayo 3), Chile, Marzo, 2018. 'Historia de la minería en Chile', Online, Available: <http://www.minmineria.gob.cl/%C2%BFque-es-la-mineria/historia-de-la-mineria-en-chile/>
- [10] Ministerio de minería, (2018, Abril 3), Tipos de Minerales, [Online], Available: <http://www.minmineria.gob.cl/%C2%BFque-es-la-mineria/tipos-de-minerales>
- [11] P. Campos, ingeniero en Minas, Universidad de Chile.
- [12] Cochilco, 'Mercado internacional del litio y su potencial en Chile', 2017.