



# Reporte Energía en Minería Minería No Metálica

Proyecto Eficiencia Energética en Minería

Marzo 2021

**Edición:**

Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40  
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5  
65760 Eschborn • Alemania

**Nombre del proyecto:**

Eficiencia Energética en Minería en Chile

Marchant Pereira 150  
7500654 Providencia  
Santiago • Chile  
T +56 22 30 68 600  
I www.giz.de

**Responsable:**

Rainer Schröder / Rodrigo Vásquez / Javier Hueichapán

**En coordinación:**

Ministerio de Energía de Chile  
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II  
Santiago de Chile  
T +56 22 367 3000  
I www.minenergia.cl

**Título:****Reporte Energía en Minería****Autor:**

AIGUASOL

Alfredo González  
Daniel González  
Yanara Tranamil  
Catalina Bravo  
Camilo Acuña  
Javier Cabezas

**Aclaración:**

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Eficiencia Energética en Minería en Chile" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa internacional sobre el clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania - BMU. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

**Santiago de Chile, 2021**

## Contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
1.1	PROYECTO EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA MINERÍA.....	5
<b>2</b>	<b>CONTEXTO Y ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
2.1	ESTRUCTURA DEL PROYECTO .....	6
<b>3</b>	<b>ENERGÍA EN MINERÍA.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>ESTADÍSTICAS DE CONSUMO DE ENERGÍA EN MINERÍA.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>PROCESOS MINEROS .....</b>	<b>10</b>
5.1	EXTRACCIÓN DE SALMUERA. EXTRACCIÓN HÚMEDA .....	10
5.1.1	<i>Descripción .....</i>	<i>10</i>
5.1.2	<i>Caracterización Energética .....</i>	<i>11</i>
5.2	LIXIVIACIÓN. LÍNEA NO METÁLICA – NITRATOS.....	12
5.2.1	<i>Descripción .....</i>	<i>12</i>
5.2.2	<i>Caracterización Energética .....</i>	<i>13</i>
5.3	EVAPORACIÓN SOLAR. LÍNEA NO METÁLICA – NITRATOS.....	13
5.3.1	<i>Descripción .....</i>	<i>13</i>
5.3.2	<i>Caracterización Energética .....</i>	<i>14</i>
5.4	PLANTA CLORURO DE POTASIO. LÍNEA NO METÁLICA – NITRATOS .....	14
5.4.1	<i>Descripción .....</i>	<i>14</i>
5.5	PLANTA NITRATOS. LÍNEA NO METÁLICA – NITRATOS.....	15
5.5.1	<i>Descripción .....</i>	<i>15</i>
5.5.2	<i>Caracterización Energética .....</i>	<i>17</i>
5.6	EVAPORACIÓN SOLAR. LÍNEA NO METÁLICA – LITIO .....	17
5.6.1	<i>Descripción .....</i>	<i>17</i>
5.6.2	<i>Caracterización Energética .....</i>	<i>18</i>
5.7	PLANTA CARBONATO DE LITIO. LÍNEA NO METÁLICA – LITIO .....	18
5.7.1	<i>Descripción .....</i>	<i>18</i>
5.7.2	<i>Caracterización Energética .....</i>	<i>19</i>
5.8	PLANTA HIDRÓXIDO DE LITIO. LÍNEA NO METÁLICA – LITIO.....	20
5.8.1	<i>Descripción .....</i>	<i>20</i>
5.8.2	<i>Caracterización Energética .....</i>	<i>20</i>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>22</b>

# 1 Introducción

En este documento se encuentra el contenido técnico de la plataforma Web “Energía en Minería”. Esta plataforma de la Agencia de Sostenibilidad Energética el cual ha sido generado e implementado por GIZ con el apoyo del Ministerio de Energía, en el marco del proyecto “Eficiencia Energética en Minería, materias primas y clima”.

Incluye la explicación de los distintos Procesos Mineros, Medidas de Eficiencia Energética que se pueden implementar en cada uno de ellos y Proyectos Implementados, todo en el ámbito de la eficiencia energética y eficiencia operacional en minería.

El sitio web interactivo se encuentra en el siguiente enlace: [www.energiaenmineria.cl](http://www.energiaenmineria.cl).

En el sitio se encuentra el siguiente mapa interactivo de proceso mineros, que incluye información específica de cada uno de ellos, de sus medidas de eficiencia energética asociadas y ejemplo de proyectos implementados.

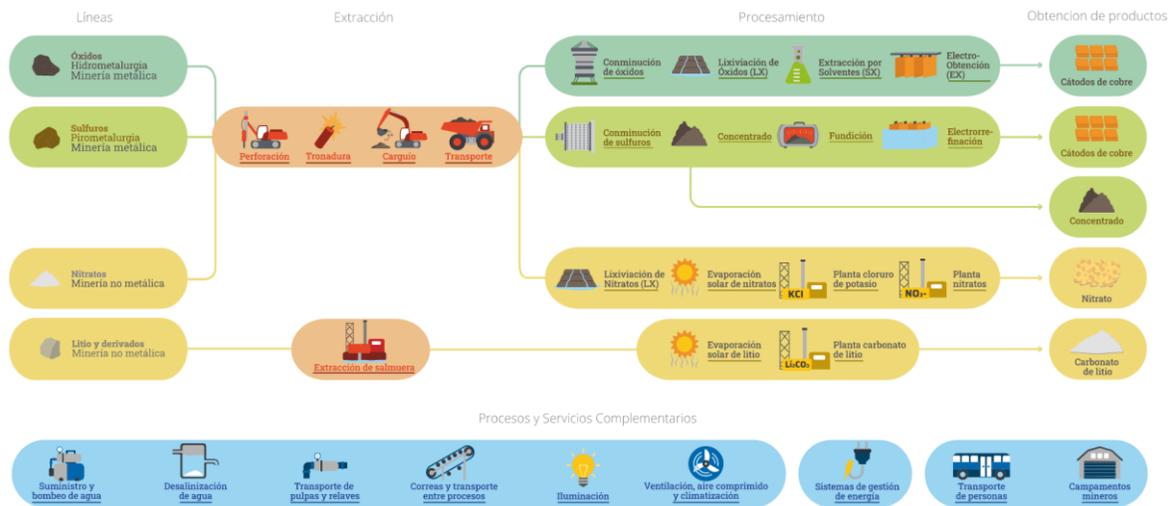


Ilustración 1. Mapa de procesos mineros. Fuente: GIZ.

El contenido técnico abarca los principales procesos consumidores de energía dentro de la Minería Metálica (Óxidos y Sulfuros) y No Metálica (Nitratos, Lito y derivados), pasando además por Procesos y Servicios Complementarios de la Minería. Estos últimos son transversales a distintos procesos, tales como: suministro de agua, desalinización, iluminación, transporte entre procesos, ventilación, etc. Se abarca además el ámbito de los Sistemas de Gestión de la Energía (SGE) y los servicios específicos a los trabajadores de la minería, tales como transporte de personas y campamentos mineros.

Por cada línea de tipo de mineral (Minería Metálica y Minería No Metálica) se explican los distintos **Procesos Mineros** y sus equipos principales que se encuentran dentro de cada uno de ellos. Todo esto desde el punto de vista del consumo de energía (eléctrica o térmica). Cada Proceso además de su descripción, incluye **Medidas de Eficiencia Energética** asociadas que es posible de implementar en cada uno de ellos. Finalmente, se presentan **Proyectos Implementados** que se han ejecutado con el fin de reducir consumos de energía o hacer más eficiente su uso, dentro en cada proceso.

El contenido técnico que aparece en este documento puede ser seleccionado por el usuario de la plataforma web, debido a que el sitio cuenta con la funcionalidad de elegir lo que se desea imprimir. Adicionalmente, se tiene la opción de imprimir el contenido completo del sitio web.

El contenido del sitio web podrá ser actualizado con nuevas Medidas de Eficiencia Energética y Proyectos Implementados, por lo cual se invita a visitarlo periódicamente. Asimismo, se invita a las empresas mineras a enviarnos sus proyectos implementados en este enlace: <https://www.energiaenmineria.cl/contacto/>

## 1.1 Proyecto Eficiencia Energética en la Minería

La GIZ, en conjunto con la Agencia de Sostenibilidad Energética (Agencia SE) y el Ministerio de Energía, buscan motivar a las empresas mineras en el país para la implementación de proyectos y medidas de eficiencia energética. En el curso del proyecto, se busca que las empresas mejoren su balance energético y climático.

Este proyecto tiene como objetivo la implementación de medidas para el aumento de la eficiencia en el uso de recursos y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector minero. Se incluye la asesoría técnica a empresas, el desarrollo de eventos y capacitaciones, la generación de material de difusión (como el presente sitio web y guía impresa) y la implementación de una Red de Eficiencia Energética y Emisiones, basada en la metodología y conceptos de las Redes de Aprendizaje.

## 2 Contexto y antecedentes

En Chile, el sector minero es uno de los mayores responsables de la emisión de CO<sub>2</sub>. Alrededor del 30% de la electricidad chilena se usa para la extraer y procesar materias primas, principalmente el cobre. Para la generación de la electricidad necesaria para este propósito, se recurre mayoritariamente a combustibles fósiles: en Chile el 40% de la energía eléctrica se genera solo a partir del carbón. A esto se suma que además de la energía eléctrica, se requieren grandes cantidades de energía térmica para el tratamiento de los metales subsidiados (cobre, molibdeno, plata, oro, litio, etc.). Por consiguiente, se calcula que en Chile el sector minero, es responsable de más de 14 millones de tCO<sub>2</sub> anuales. En los últimos años, la demanda energética del sector minero ha aumentado anualmente un promedio de 4%. A pesar de que los procesos de producción tienen un notable potencial de ahorro y de que Chile depende casi completamente de las importaciones de petróleo, gas natural y carbón, los planes concretos para la implementación de medidas de eficiencia energética han jugado un rol minoritario.

En la actual agenda de energía (2018- 2022) se encontraba prevista la adopción de una nueva Ley de Eficiencia Energética, promulgada en febrero de 2021. Esta ley pretende aplicar medidas de ahorro energético a los mayores consumidores de energía del país, incluyendo al sector minero. Este desarrollo adquiere un empuje adicional a través de Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (PANCC 2017-22), la discusión sobre las metas ambiciosas metas nacionales en materia de protección climática (NDC) y la Conferencia Mundial del Clima COP25 ejecutada en 2019 en España siendo Chile el país anfitrión.

Para la economía chilena, la industria del cobre es el mayor motor de crecimiento. El posicionamiento de la minería en la economía política puede demostrarse en los siguientes datos: más del 9% del total de empleos, aprox. el 13% del PIB total y más del 50% de las exportaciones dependen de este sector.

**Proyecto financiado por:** Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU).

**Gestionado por:** GIZ Chile

**Contrapartes:** Ministerio de Energía de Chile, Agencia de Sostenibilidad Energética.

**Duración:** Abril 2019 – Marzo 2022

## 2.1 Estructura del proyecto

Por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU), la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) apoya al Gobierno de Chile en el marco de la Iniciativa Climática Internacional (IKI), en la integración activa del sector de materias primas a la estrategia nacional de protección del clima y en la restricción de los daños y la contaminación ambiental asociada a la extracción de estas materias. Se trata de un proyecto transnacional que, además, de las medidas en Chile, incluye actividades en el sector minero de Colombia. En Chile, el aspecto de la eficiencia energética está en primer plano. Los principales hallazgos buscan aportar al debate regional y global sobre medidas de eficiencia energética en la minería.

### 3 Energía en Minería

El sector Minero consume energía en forma de Combustibles como de Electricidad en proporciones relativamente equivalentes. Este consumo muestra un incremento sostenido entre el año 2010 y 2018 de un 4,5% anual tanto para el consumo de combustibles como de electricidad.

El consumo principal de combustibles ocurre en el proceso de Mina Rajo (sobre 65.000 TJ al año) y el principal consumo de electricidad se observa es el área de Concentrado (sobre 50.000 TJ anuales), seguida posteriormente por los tres principales procesos de hidrometalurgia (LX/SX/EX) con 20.000 TJ y de Servicios con un poco menos de 10.000 TJ.

### 4 Estadísticas de Consumo de Energía en Minería

De acuerdo con el Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2000-2019 elaborado en 2020 por Cochilco es posible comprender como se distribuye y cómo ha evolucionado el consumo de energía en el sector de la minería.

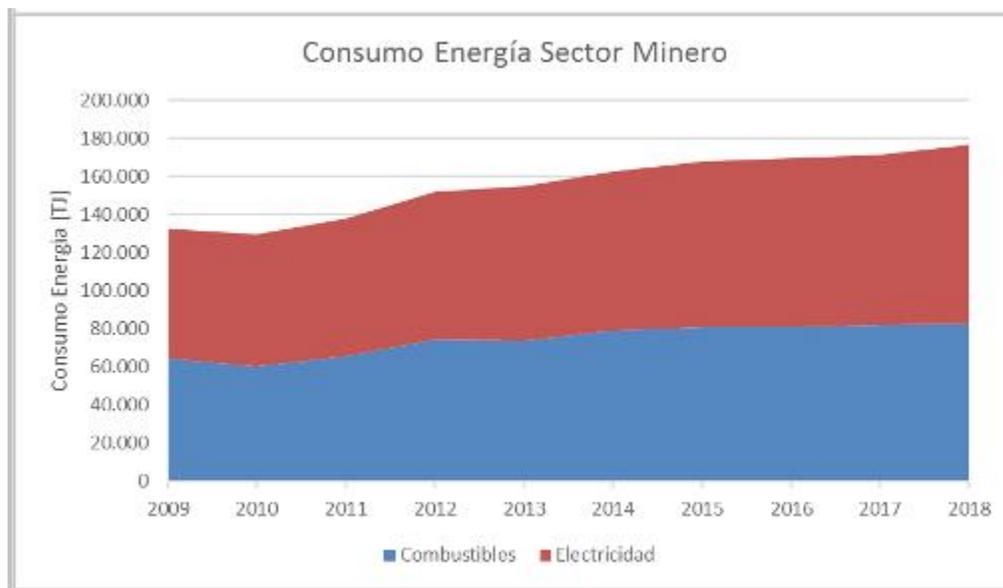


Ilustración 2. Consumo de energía en sector minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

El sector Minero consume energía tanto en forma de Combustibles como de Electricidad en proporciones relativamente equivalentes. La evolución de este consumo muestra un incremento sostenido entre el año 2010 y 2018 de un 4,5% anual tanto para el consumo de combustibles como de electricidad.

Este consumo se observa desagregado por área de proceso en la siguiente gráfica en donde se aprecia que el consumo principal de combustibles ocurre en el proceso de Mina Rajo y se explica por el combustible utilizado por los camiones para el transporte principalmente del mineral. Los restantes consumos de combustibles en otras áreas de proceso son considerablemente menores llegando a una décima parte en la fundición que corresponde a la segunda área con mayor consumo energético en forma de combustibles. Al observar los consumos de electricidad, por otra parte, se observa que

el principal consumidor de este tipo de energético en el país es el área de concentrado que alcanza un valor sobre los 50.000 TJ anuales, seguida posteriormente por los tres principales procesos de hidrometalurgia (LX/SX/EX) con 20.000 TJ y de Servicios con un poco menos de 10.000 TJ.

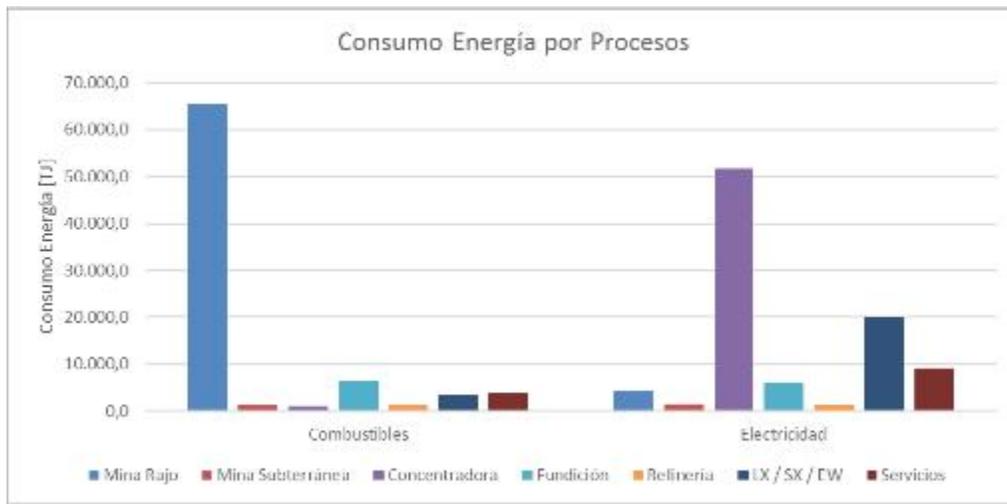


Ilustración 3. Consumo de energía por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

Finalmente, podemos observar la intensidad energética, es decir el consumo de energía por tonelada de mineral fino contenido en cada área de proceso.

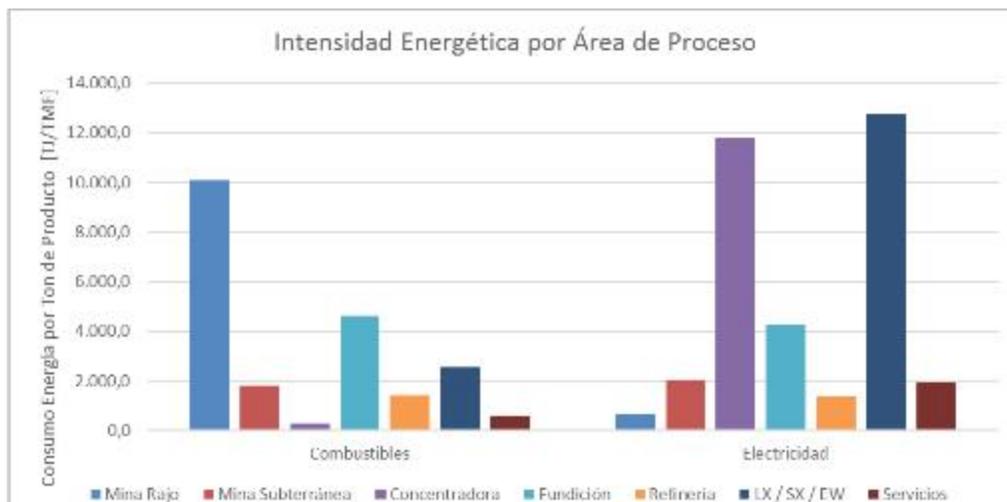


Ilustración 4. Consumo de energía en por tipo de combustibles y procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

Este gráfico permite observar la relevancia del consumo de energía de otros procesos que no se observaban en el gráfico anterior, ya que esta vez el consumo se referencia a una tonelada de mineral fino procesado por cada área y no al total de consumo del país que puede verse influenciado por una mayor concentración de plantas de un tipo frente a otras. En este sentido, en términos de consumo de combustibles el área principal de consumo sigue siendo la Mina Rajo, pero le sigue en importancia el área de fundición y los procesos de hidrometalurgia. Por otra parte, en relación con el consumo de electricidad, se aprecia que los procesos ligados a la hidrometalurgia poseen la mayor intensidad de consumo eléctrico, incluso por sobre el área de concentrados que poseía los consumos eléctricos más relevantes a nivel nacional.

Finalmente, se presenta este mismo gráfico, pero sumando los componentes de combustibles y electricidad. De este modo, se puede observar la intensidad total de energía por área de proceso. Los procesos de hidrometalurgia pasan a ser el área de proceso de mayor consumo de energía por tonelada de mineral fino producido, seguido por la concentradora, mina rajo, fundición y más abajo mina subterránea, refinera y servicios.

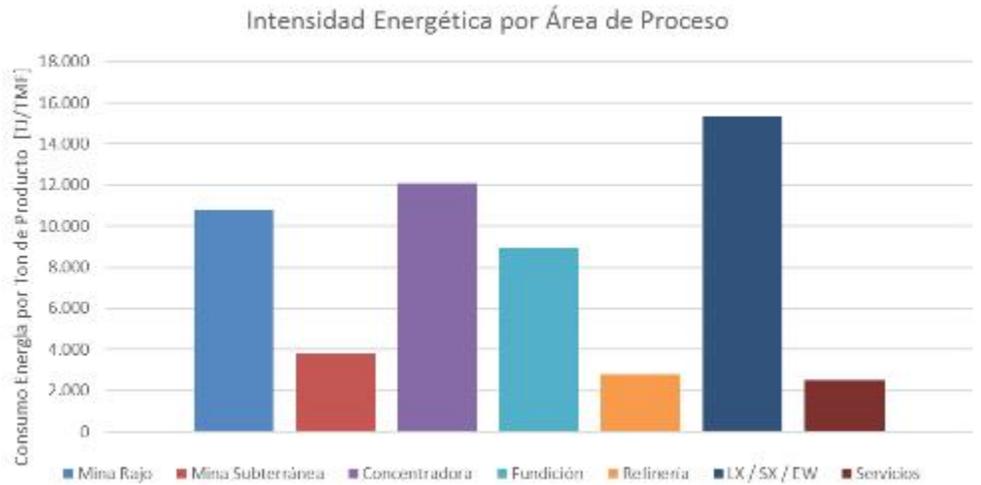


Ilustración 5. Intensidad energética por procesos en minería en Chile. Fuente: Cochilco, 2020.

## 5 Procesos mineros

### 5.1 Extracción de Salmuera. Extracción Húmeda

#### 5.1.1 Descripción

Más del 40% de las reservas mundiales conocidas de litio están ubicadas en el Salar de Atacama en forma de salmueras, es por este motivo que Chile se posiciona a nivel mundial como un actor de gran importancia en lo que respecta a la producción de Litio.

La salmuera es extraída desde las profundidades del suelo utilizando bombas principalmente de tipo verticales debidamente diseñadas para trabajar con fluidos viscosos como es la salmuera. Las profundidades de extracción van desde los 1,5 m hasta los 150 m. Para este propósito se realizan una gran cantidad de orificios en la tierra, en los cuales se aplican tronaduras a partir de explosivos. De En estos orificios finalmente se instalan un conjunto de bombas que se encargan de extraer la salmuera desde el subsuelo.



Ilustración 6. Aplicación de tronaduras para extracción de salmuera. Fuente: SQM

A partir de la salmuera obtenida, mediante este método y sus posteriores procesamientos, se obtienen los concentrados necesarios para la obtención del Litio y, además, de Nitratos de Potasio, ya que este concentrado contiene Cloruro de Potasio, compuesto que reacciona con el Nitrato de Sodio (obtenido del caliche) para la obtención de Nitrato de Potasio. Asimismo, se obtiene Cloruro de Litio como subproducto de la producción de Cloruro de Potasio, el cual es esencial para la obtención de Carbonato de Litio e Hidróxido de Litio, productos finales de la producción de Litio.

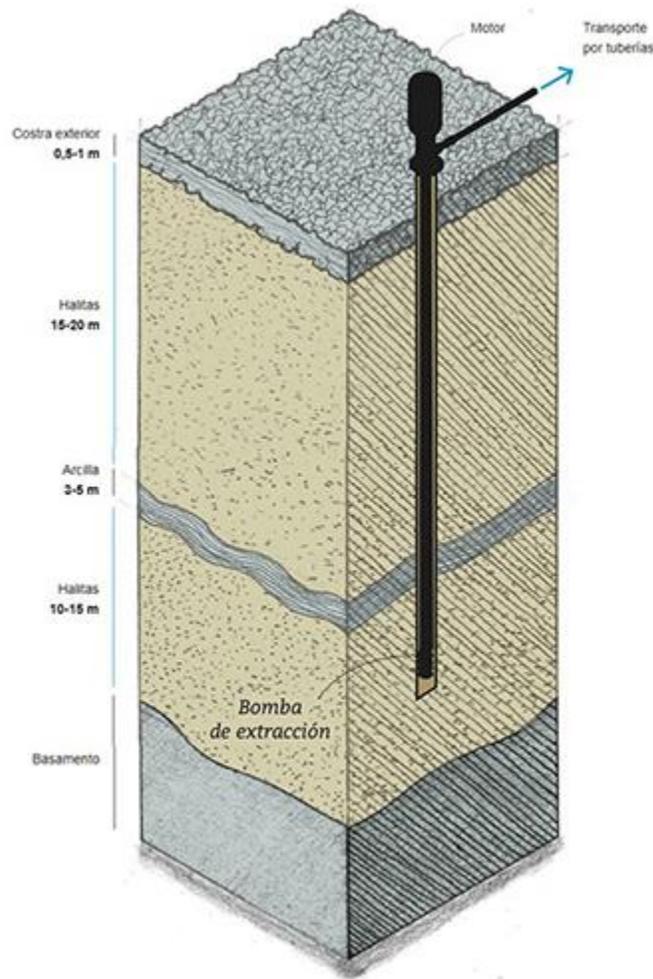


Ilustración 7. Pozo de extracción de salmuera. Fuente: SQM

### 5.1.2 Caracterización Energética

Los consumos de energía de esta primera etapa de la minería no-metálica vienen dados principalmente por el uso de maquinaria para la realización de las perforaciones y tronaduras y posteriormente por el consumo eléctrico de las bombas de succión de salmuera.

Una bomba vertical de extracción de salmuera puede alcanzar perfectamente los 200 kW de potencia cada una, siendo por tanto, el principal foco de consumo eléctrico del proceso.



Ilustración 8. Bomba vertical de extracción de salmuera. Fuente: Catálogo Bombas VOGT

## 5.2 Lixiviación. Línea no Metálica – Nitratos

### 5.2.1 Descripción

La finalidad de este proceso es extraer sales de nitrato y yodo del caliche, por consiguiente, para lograr esto se debe adaptar una zona de gran superficie -400 m x 90 m, por ejemplo- en donde se depositará el caliche previamente tronado. La superficie de estas zonas se debe impermeabilizar, esto se realiza mediante una carpeta de polietileno de alta densidad, de esta forma la lixiviación no penetra el subsuelo. Una vez impermeabilizado el suelo se deposita el caliche sobre las carpetas de polietileno hasta alcanzar una altura entre 6 a 10 metros, generándose las pilas de lixiviación.

Mediante aspersores en la parte superior de la pila de lixiviación se utiliza agua a temperatura ambiente, ésta escurre por el caliche llevando consigo el yodo y las sales de nitrato, la solución generada desciende hasta la zona impermeable y es recuperada mediante colectores para ser trasladada a su siguiente tratamiento. Cabe destacar que la lixiviación de salmueras ocurre simplemente por dilución natural de ésta en contacto con agua, a diferencia de la lixiviación de minerales metálicos que requiere de reacciones químicas más sofisticadas para la dilución de los minerales.

Todo este proceso también se le denomina “lixiviación en frío” que se diferencia de la “lixiviación en caliente” mediante el proceso Guggenheim que era la forma de producir salitre en la antigüedad. Esta metodología de lixiviación ha quedado obsoleta por su alto costo que hoy en día no la hace rentable.

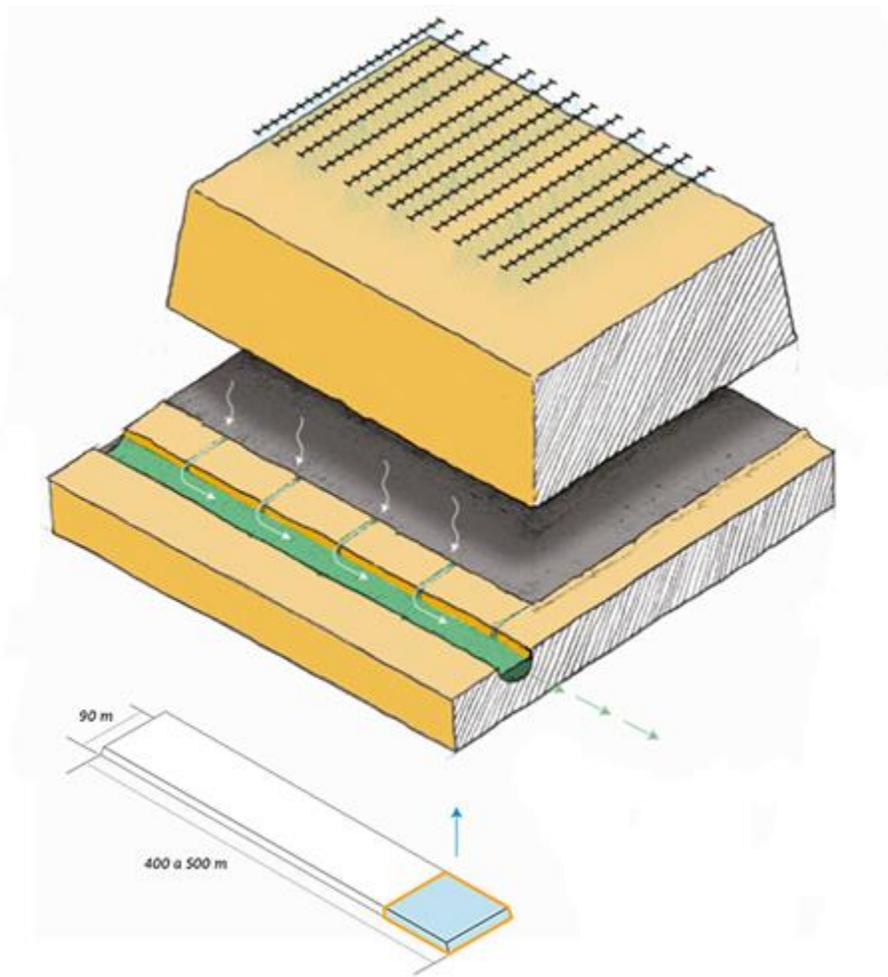


Ilustración 9. Esquema de sección de pila de lixiviación de salmuera. Fuente: SQM

### 5.2.2 Caracterización Energética

Los consumos de energía en esta etapa del proceso se concentran principalmente en el bombeo de agua para los aspersores ubicados sobre las pilas de lixiviación. Los consumos de estas bombas son significativamente menores que los requeridos para la extracción de la salmuera.

## 5.3 Evaporación Solar. Línea no Metálica – Nitratos

### 5.3.1 Descripción

Para este proceso se requiere de zonas compactas en la superficie donde se llevará a cabo el proceso de evaporación solar. Estas zonas son cubiertas en su superficie con un material impermeable, el cual suele ser plástico. Luego estas piscinas son llenadas con la solución de agua y sales de nitrato obtenida mediante el proceso de lixiviación previamente realizado. Una vez depositada la solución y al encontrarse en contacto directo con la radiación solar, el agua que contiene comienza a evaporarse, logrando que las sales se concentren, cristalicen y precipiten, siendo posible la extracción de éstas. Este proceso puede llegar a tomar meses según el tamaño de las piscinas.

Cabe destacar que el norte de Chile posee características favorables para este proceso, ya que es una de las zonas del mundo con mayor índice de radiación solar, presenta escasez de lluvias y la salmuera extraída posee bajo contenido de magnesio, lo cual disminuye los costos de procesamiento.



Ilustración 10. Piscinas de evaporación solar.

### 5.3.2 Caracterización Energética

Este proceso se caracteriza porque su principal requerimiento energético se satisface con la energía del sol, por lo tanto, en términos energéticos es un proceso considerablemente eficiente y renovable.

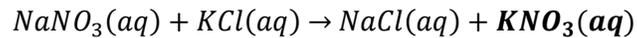
Además de este consumo energético del sol, este proceso consume energía en maquinarias para el depósito y extracción de los minerales depositados al final del período de evaporación del agua. Estas corresponden principalmente a palas y camiones para movilización del material. Además, se pueden observar consumos eléctricos nuevamente asociados a bombeo de salmuera.

## 5.4 Planta Cloruro de Potasio. Línea no Metálica – Nitratos

### 5.4.1 Descripción

En esta planta se reacciona el Nitrato de Sodio ( $\text{NaNO}_3$ ), también conocido como salitre chileno, obtenido mediante la evaporación solar con Cloruro de Potasio (KCl), este último puede ser obtenido desde el Salar de Atacama mediante un sistema de bombeo subterráneo y posterior procesamiento. Luego de esta reacción se obtienen como productos Cloruro de Sodio (NaCl) -sal de mesa- y Nitrato de Potasio ( $\text{KNO}_3$ ).

La reacción señalada se presenta a continuación:



El nitrato de potasio es posteriormente transportado a la Planta de Nitratos donde es tratado para finalmente obtener pequeñas esferas de nitrato, conocidas como pril o granulado.



Ilustración 11. Planta Cloruro de potasio.

## 5.5 Planta Nitratos. Línea no Metálica – Nitratos

### 5.5.1 Descripción

Una vez abandonada la planta de Cloruro de Potasio, el Nitrato de Potasio ( $\text{KNO}_3$ ), obtenido como concentración acuosa, ingresa a la Planta de Nitratos. En esta planta se realizan una serie de etapas para obtener como producto final pequeñas esferas de entre 2 a 3 milímetros de diámetro, conocidas como pril o granulado de Nitrato de Potasio. El proceso completo para la obtención de pril se denomina prilado.

A continuación, se describe el proceso de prilado, el cual se puede dividir en 5 etapas:

- 1) **Secado:** se extrae la humedad presente en la concentración, alcanzando una humedad inferior al 0,05%. Este proceso se hace a una temperatura de aproximadamente 80°C.
- 2) **Fundido:** utilizando un horno, el Nitrato seco es fundido a 400 °C aproximadamente, formando Nitrato de líquido.
- 3) **Prilado:** el Nitrato a alta temperatura y, por lo tanto, líquido es bombeado a la torre de granulado o prilado. Ésta en su parte superior receipta el material fundido en recipientes especialmente diseñados para este propósito, llamados *prill pots* (“ollas de pril”). Los recipientes en su superficie inferior poseen cientos de orificios por los cuales el nitrato fundido escurre, de esta forma se genera un goteo constante de material hacia la base de la torre

de granulado. Durante el trayecto -caída libre- las gotas se enfrían y solidifican, sintetizándose de esta forma las esferas de Nitrato o pril.

- 4) **Selección y Enfriado:** empleando harneros, el producto es seleccionado, filtrando y desechando cualquier irregularidad en el material granulado. Asimismo, durante este proceso, el nitrato es enfriado y se encuentra listo para el acopio.
- 5) **Acopio:** finalmente el nitrato granulado es almacenado y depositado en infraestructura de acopio para ser posteriormente transportada.

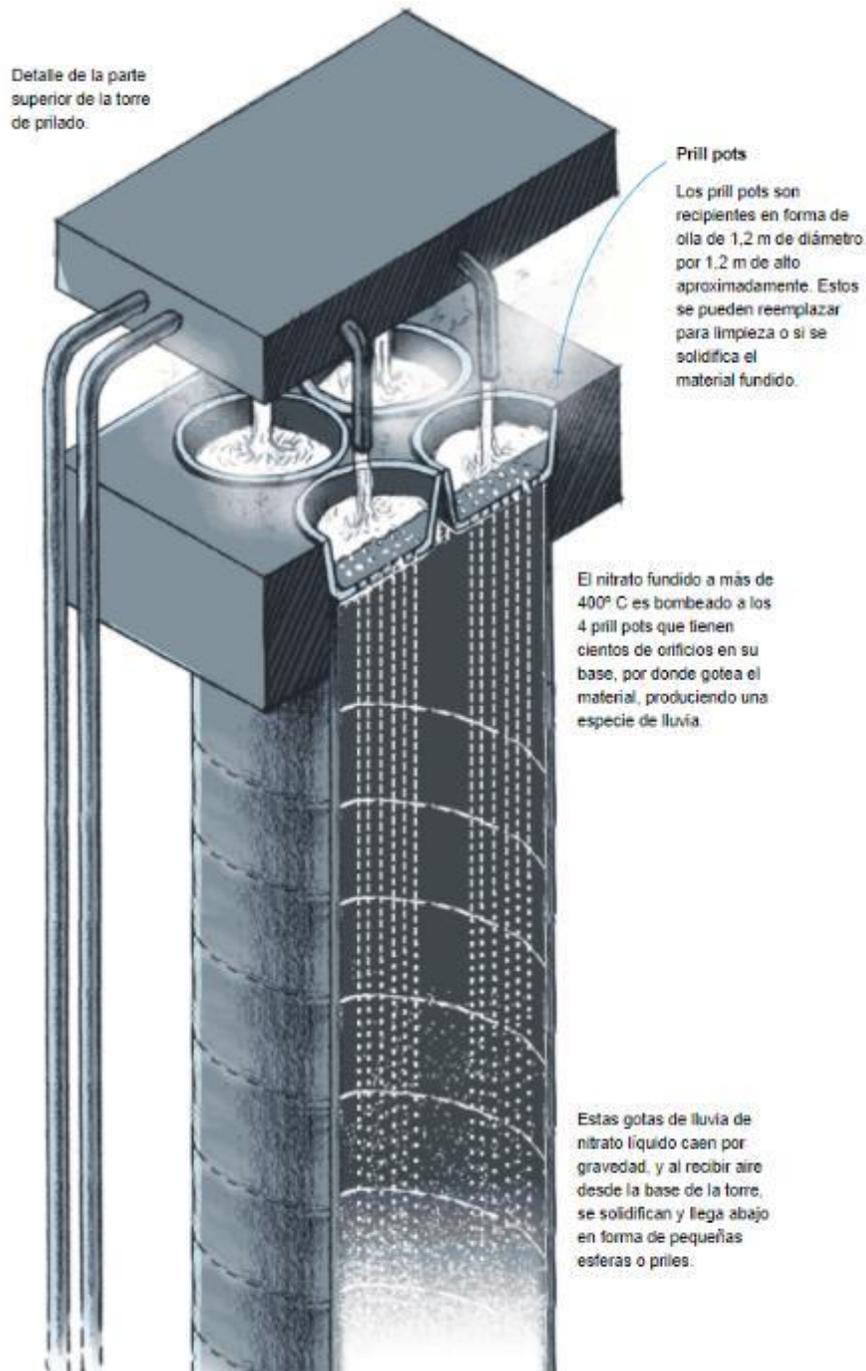


Ilustración 12. Torre de granulado o prilado. Fuente: SQM

## 5.5.2 Caracterización Energética

Los consumos de energía de este proceso son intensivos en energía térmica. Para ello se utilizan diversas tecnologías, principalmente calderas a vapor y hornos para el fundido a 400°C. También se utilizan diversos tipos de motores para el bombeo de soluciones acuosas y para el funcionamiento de correas transportadoras en torno al proceso de pilado.

## 5.6 Evaporación Solar. Línea no Metálica – Litio

### 5.6.1 Descripción

Posterior a la extracción de la salmuera desde el subsuelo se procede a la evaporación del agua presente en esta disolución. Por consiguiente, para lograr esto se deposita la salmuera en piscinas previamente acondicionadas para este propósito. Las piscinas son llenadas mediante un sistema de bombeo.

Dado que las piscinas con salmuera se encuentran en contacto con la radiación solar, el agua se evapora dejando como resultado un producto concentrado en potasio, sulfato, sodio, cloruro, calcio, magnesio y litio. El litio presente en esta solución alcanza hasta un 6% del total, sin embargo, éste viene acoplado al cloro, en forma de Cloruro de Litio (LiCl) presente en 30-35% del total. Una vez que el concentrado alcanza la concentración deseada -aproximadamente 6000 ppm de Litio- es posteriormente transportado a la planta de Carbonato de Litio.

Desde que el concentrado es depositado en las piscinas hasta que el agua se evapora completamente, toma entre 13 a 16 meses en total. Tiempo necesario para que la solución de Cloruro de Litio alcance las concentraciones mínimas para ser extraída.

Cabe destacar que el norte de Chile posee características favorables para este proceso, ya que es una de las zonas del mundo con mayor índice de radiación solar, presenta escasas lluvias y la salmuera extraída posee bajo contenido de magnesio, lo cual disminuye los costos de procesamiento.



Ilustración 13. Piscinas de evaporación solar.

## 5.6.2 Caracterización Energética

Más del 95% de la energía utilizada en este proceso proviene de energía solar. En SQM se cuantificó que la cantidad de energía “ahorrada” -gracias a la radiación solar- corresponde a 19.000 GWh aproximadamente, equivalente a un cuarto de la producción total de Chile en un año.

Además del uso de energía solar, en este proceso se utilizan diversos equipos de bombeo para el llenado de las piscinas previo a su evaporación, los que utilizan energía eléctrica. Y además, se utilizan equipos de carguío y camiones para el transporte del concentrado a la planta de carbonato de litio.

## 5.7 Planta Carbonato de Litio. Línea no Metálica – Litio

### 5.7.1 Descripción

La solución de Cloruro de Litio (LiCl) obtenida mediante la evaporación solar -y con la concentración adecuada- es recepcionada en la Planta de Carbonato de Litio. Primero se eliminan impurezas residuales que aún pueda contener la solución, específicamente, boro y magnesio. Además, filtros magnéticos remueven las partículas metálicas que pueda contener la mezcla.

Posterior a esto, la solución de Cloruro de Litio pura se mezcla y es reaccionada con Carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Gracias a esta reacción, el Carbonato de Litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) precipita, para ser luego lavado, secado, compactado, tamizado y micronizado para su posterior venta.

Por lo tanto, mediante los procesos señalados se obtiene Carbonato de Litio, indispensable para la producción de vidrios, cerámicos y cementos especiales, además de ser un elemento esencial en diversas industrias químicas.

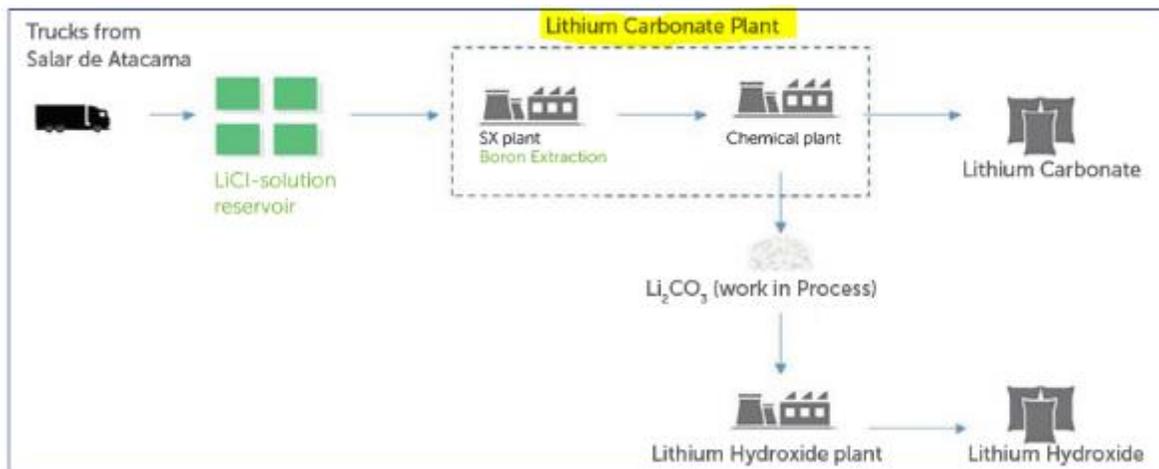


Ilustración 14. Identificación del proceso de producción de carbonato de litio. Fuente: Sustainability of lithium production in Chile, SQM 2020.

### 5.7.2 Caracterización Energética

La producción de carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) en Chile tiene un consumo bajo de energía, si se le compara con su producción en otros países en base a espodumena como ocurre por ejemplo en Australia o China. La producción en base a salmuera, como se realiza en Chile, permite alcanzar consumos específicos de aproximadamente un 50% respecto a la producción en base a espodumena.

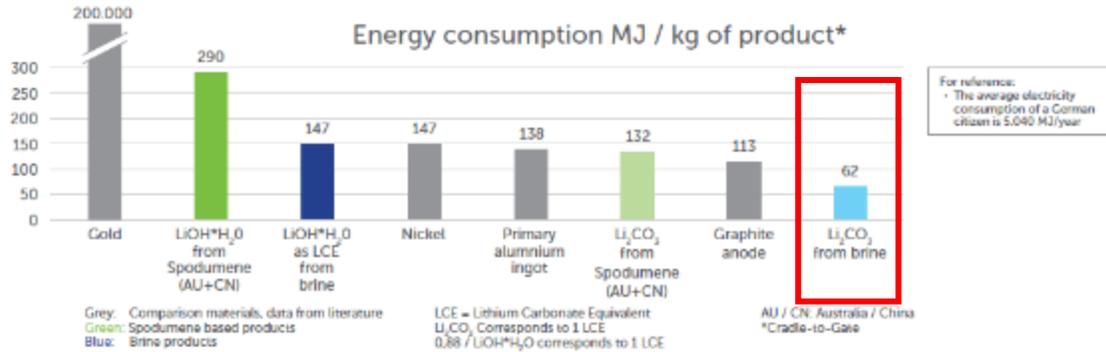


Ilustración 15. Consumo específico de energía en la producción de litio. Fuente: Sustainability of lithium production in Chile, SQM 2020.

De la figura anterior se observa que el consumo específico de Carbonato de Litio a partir de salmuera alcanza los 62 MJ/kg de producto terminado. Así también, en términos de huella de carbono, se ha identificado que un kg de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  conlleva una emisión de 4 kg de  $\text{CO}_2\text{e}$ .

Finalmente, en términos de consumo global de energía, en el año 2018 se identificó que un 42% del consumo global de energía en producción de litio provenía específicamente de la producción de Carbonato de Litio proveniente de salmuera.

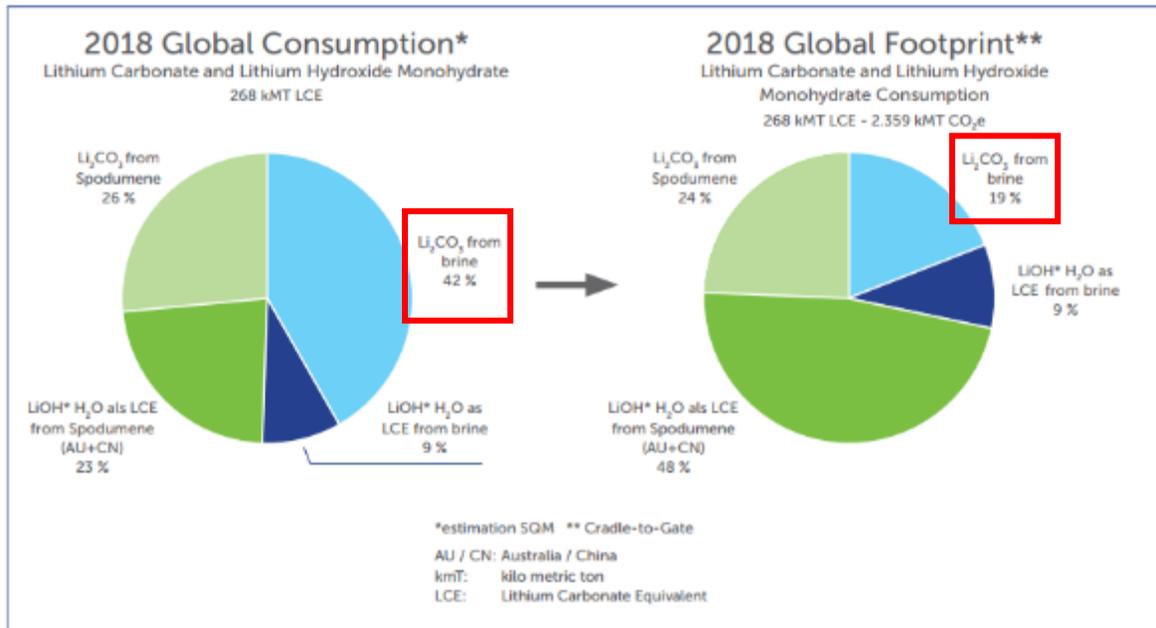


Ilustración 16. Distribución global del consumo de energía en la producción de litio. Fuente: Sustainability of lithium production in Chile, SQM 2020.

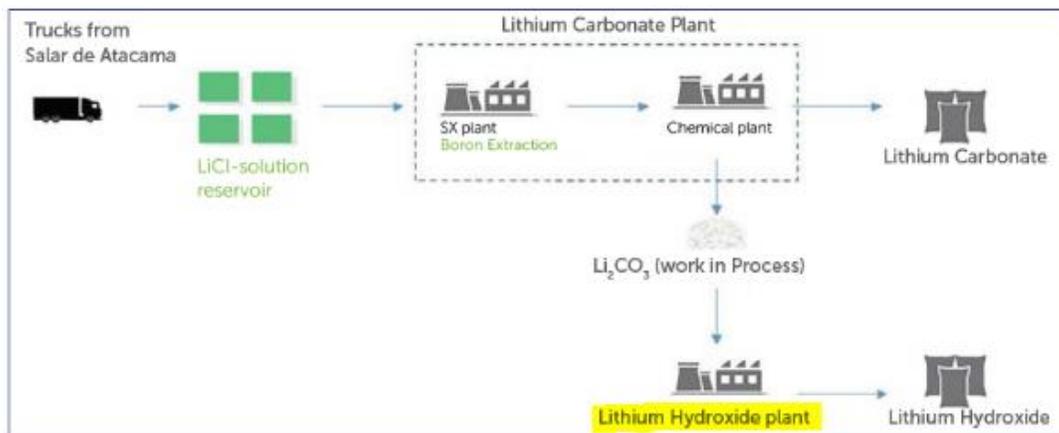
## 5.8 Planta Hidróxido de Litio. Línea no Metálica – Litio

### 5.8.1 Descripción

En esta planta se obtiene como producto final Hidróxido de Litio (LiOH), el cual se clasifica en dos distintos grados según su aplicación, por un lado Hidróxido de Litio de grado técnico (grasas lubricantes) y, por otro, Hidróxido de Litio de grado batería (baterías recargables).

Para la obtención del Hidróxido de Litio se requiere de Carbonato de Litio (CaCO<sub>3</sub>), el mismo que es obtenido en la Planta de Carbonato de Litio, por lo tanto, desde esta planta se alimenta Carbonato de Litio aún en proceso hacia la Planta de Hidróxido de Litio.

Finalmente, para conseguir el Hidróxido de Litio, se reacciona el Carbonato de Litio con Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), generándose como productos Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>) e Hidróxido de Litio.



### 5.8.2 Caracterización Energética

La producción de Hidróxido de Litio (LiOH) en Chile, al igual que para el caso del Carbonato de Litio, tiene un consumo bajo de energía si se le compara con su producción en otros países en base a espodumena como ocurre por ejemplo en Australia o China. La producción en base a salmuera, como se realiza en Chile, permite alcanzar consumos específicos de aproximadamente un 50% respecto a la producción en base a espodumena.

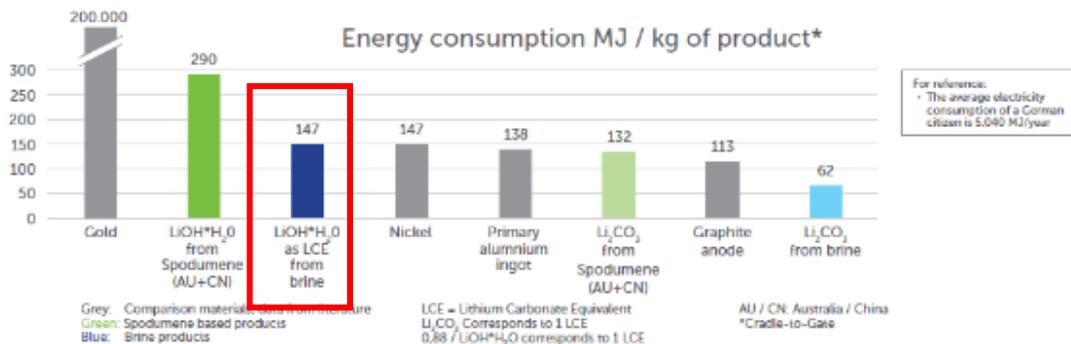


Ilustración 17. Consumo específico de energía en la producción de litio. Fuente: Sustainability of lithium production in Chile, SQM 2020.

De la figura anterior se observa que el consumo específico de Hidróxido de Litio a partir de salmuera alcanza los 147 MJ/kg de producto terminado. Así también, en términos de huella de carbono, se ha identificado que un kg de LiOH conlleva una emisión de 9,4 kg de CO<sub>2</sub>e.

Finalmente, en términos de consumo global de energía, en el año 2018 se identificó que un 9% del consumo global de energía en producción de litio provenía específicamente de la producción de Hidróxido de Litio proveniente de salmuera. Este consumo menor corresponde a también una menor producción global a diferencia del Carbonato de Litio.

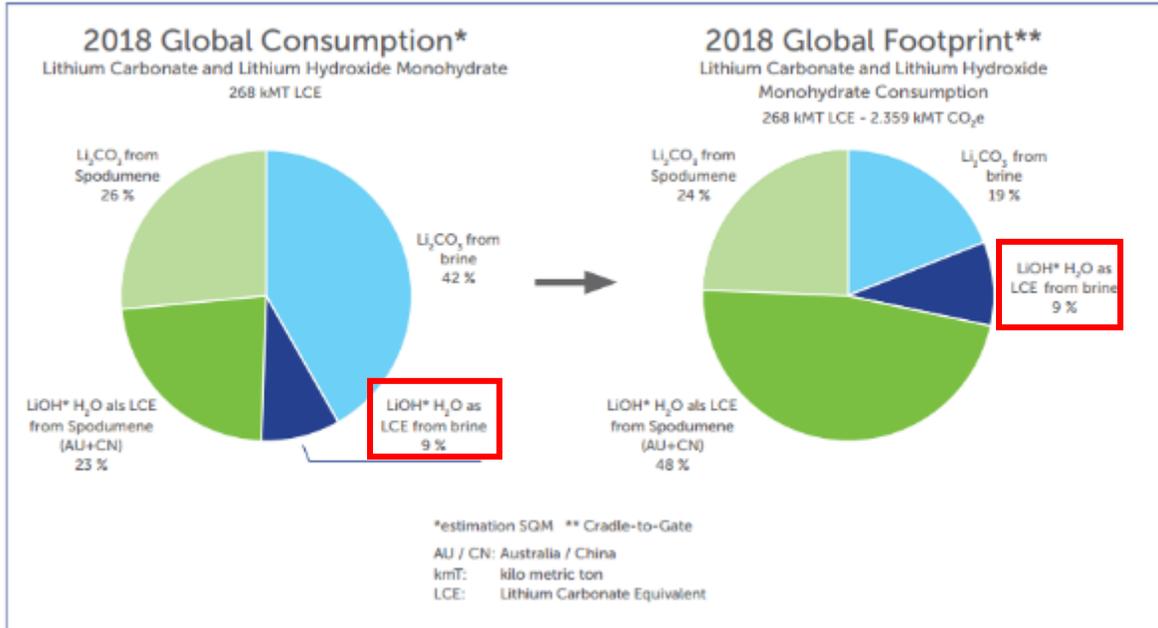


Ilustración 18. Distribución global del consumo de energía en la producción de litio. Fuente: Sustainability of lithium production in Chile, SQM 2020.

## 6 Bibliografía

- [1 C. Karpuz, «Energy Efficiency of Drilling Operations,» 2017.  
]
- [2 «Revista Seguridad Minera,» [En línea]. Available:  
] <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/perforacion-minera-tipos-clases-de-maquinaria-y-ubicacion-de-taladros/>. [Último acceso: 2020].
- [3 M. Mansouri, «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Two-AtlasCopco-drilling-machines-Pitviper-351-in-the-process-of-drilling-targets-in-a\\_fig6\\_296474523](https://www.researchgate.net/figure/Two-AtlasCopco-drilling-machines-Pitviper-351-in-the-process-of-drilling-targets-in-a_fig6_296474523). [Último acceso: 2020].
- [4 «Mining And Construction,» [En línea]. Available:  
] <https://miningandconstruction.com/mining/undergroundmining/efficiency-as-strong-as-iron-2607/>. [Último acceso: 2020].
- [5 The Warren Centre, «Zero Emission Copper Mine of the Future,» 2020.  
]
- [6 Portal Minero, Manual General de Minería y Metalurgia, 2006.  
]
- [7 M. Rojas, «Descripción cuantitativa de los procesos de extracción y reducción de mineral en la minería de cobre a cielo abierto,» 2009.
- [8 A. Aguirre, «Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía en sociedad contractual minera El Abra,» Santiago de Chile, 2016.
- [9 «Minería Chilena: Fragmentación y tronadura - Optimización energética de operaciones mineras,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/fragmentacion-tronadura-optimizacion-energetica-operaciones-mineras/#>. [Último acceso: 2020].
- [1 H. González, «Selección y asignación óptima de equipos de carguío para el cumplimiento de un 0) plan de producción en minería a cielo abierto,» Santiago de Chile, 2017.
- [1 J. Ortiz, «Apuntes de Curso de Explotación de Minas,» Santiago de Chile.  
1]
- [1 Sandvik, «Rock Technology,» [En línea]. Available: <https://www.rocktechnology.sandvik/es-2/la/productos/cargadores-y-camiones-subterr%C3%A1neos/equipos-lhd-subterr%C3%A1neos-avanzados/>. [Último acceso: 2020].
- [1 INACAP, «Extracción Mina».  
3]

[1 Ferrostaal, «Ferrostaal,» [En línea]. Available: <https://www.ferrostaal.com/es/referencias-4-ferrostaal/locomotora-minera-para-mina-subterranea-de-cobre-de-codelco-chile/>. [Último acceso: 2020].

[1 Chang Ja Kim, «Diseño y evaluación técnico económica de un nuevo sistema de carguío y 5] transporte para la minería de hundimiento,» Santiago de Chile, 2009.

[1 R. Castro, «Sistemas de Extracción Vertical,» Santiago de Chile.  
6]

[1 Jack de la Vergne, «Diccionario Técnico de Mineros y Petroleros,» 2012.  
7]

[1 T. Masquimillan, «Harneros,» [En línea]. Available:  
8] <https://es.slideshare.net/tomasgmp/harneros>. [Último acceso: 2020].

[1 P. Navarro, «Slide Share,» [En línea]. Available:  
9] <https://es.slideshare.net/BrunoVillanueva/30712-materialdeestudiopartei-diap180>. [Último acceso: 2020].

[2 Balasubramanian, «Size reduction by crushing methods,» Mysore.  
0]

[2 J. Jeswiet y A. Szekeres, «Energy Consumption in Mining Comminution,» Canadá, 2016.  
1]

[2 Mackorn, «Mackorn Products,» [En línea]. [Último acceso: 2020].  
2]

[2 Rivet, «Catálogo Rivet,» 2006. [En línea].  
3]

[2 J. Sandoval, «Mejoramiento Plan de Mantenimiento Área Seca, Chancado Fino, Gerencia de  
4] Mantención Cátodos, Minera Escondida Limitada,» Concepción, Chile, 2015.

[2 Salas Hnos Ltda, «Catálogo Ingeniería y Construcciones Salas Hnos Ltda,» Santiago de Chile.  
5]

[2 Codelco, «Lixiviación,» Chile, 2019.  
6]

[2 Dirección de Estudios y Políticas Públicas, «Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética  
7] en Minería».

[2 Cochilco, «Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2000-2019,» 2020.  
8]

[2 B. Valenzuela, «Balance Térmico de Soluciones Asociadas al Circuito SX-EW,» 2012.  
9]

- [3 «Minería Chilena,» [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/el-consumo-0-especifico-de-energia/#>. [Último acceso: 2020].
- [3 R. Sabbagh, «Theoretical and Experimental Investigation of Hydrocyclone Performance and the 1] Influence of Underflow Pumping Effect,» 2015.
- [3 Gaines, Energy and Materials Flow in the Copper Industry, 1980.  
2]
- [3 Ministerio de Energía y Minas, «Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de 3] diagnóstico energético,» Perú.
- [3 Portal Minero, «Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras II,» Portal Minero Ediciones, Chile.  
4]
- [3 G. Aravena, «Slide Share,» [En línea]. Available:  
5] <https://es.slideshare.net/GabrielAravena/167573358-espesamientoyfiltrado>. [Último acceso: 2020].
- [3 Universidad de Chile, «Separación sólido - líquido,» Santiago de Chile.  
6]
- [3 G. Riveros, «Fundamentos de Metalurgia Extractiva,» 2010.  
7]
- [3 U.S. Department of Energy, «An assessment of energy requirements in proven and new copper 8] processes,» University of Utah, 1980.
- [3 G. Riveros, «Pirometalurgia,» Universidad de Chile, 2009.  
9]
- [4 Comisión Chilena del Cobre, «Tecnología en fundiciones de cobre,» Chile, 2015.  
0]
- [4 Metso, «Chancador Giratorio Primario,» [En línea]. Available:  
1] <https://www.metso.com/es/productos/chancadores/chancadores-giratorios-primarias/chancador-giratorio-primario-superior/chancador-giratorio-primario-superior-60-110e/>. [Último acceso: 2020].
- [4 McLanahan, «Zarandas Vibratorias,» [En línea]. Available:  
2] <https://www.mclanahan.com/es/productos/zarandas-vibratorias>. [Último acceso: 2020].
- [4 Minera Cerro Verde, «Chancado Primario Sociedad Minera Cerro Verde,» [En línea]. Available:  
3] <https://i.ytimg.com/vi/w8j1k5eeoNg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [4 SPD, «Minera Tres Valles recibe fondo de Anglo American para impulsar proyectos,» [En línea].  
4] Available: <https://southpacificdrilling.com/minera-tres-valles-recibe-fondos-de-anglo-american-para-impulsar-proyectos/>. [Último acceso: 2020].

- [4 Minería Chilena, «Características de plantas SX pequeñas y medianas,» [En línea]. Available: 5] <https://www.mch.cl/reportajes/caracteristicas-de-plantas-sx-pequenas-y-medianas/#>. [Último acceso: 2020].
- [4 Camiper, «Metalurgia: ¿Qué es la electroobtención y para qué sirve?,» 2019. [En línea]. 6] Available: <https://camiper.com/tiempominero/wp-content/uploads/2019/10/metalurgia-electroobtencion.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [4 Rumbo Minero, «Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino,» [En 7] línea]. Available: <https://www.rumbominero.com/revista/informes/chancado-y-molienda-en-mineria-paso-previo-hacia-el-material-fino/>. [Último acceso: 2020].
- [4 Minería Chilena, «Sensores de vanguardia para optimizar la flotación de concentrados,» [En 8] línea]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/highservice-sensoflot-sensores-vanguardia-optimizar-la-flotacion-concentrados/>. [Último acceso: 2020].
- [4 Federación Minera, «Antofagasta Minerals definiría sus inversiones el 2017,» [En línea]. 9] Available: <http://www.federacionminera.cl/antofagasta-minerals-definiria-sus-inversiones-el-2017/>. [Último acceso: 2020].
- [5 Metso, «Horno térmico Grate Kiln Indurating Machine,» [En línea]. Available: 0] <https://www.directindustry.es/prod/metso-corporation/product-9344-1294367.html>. [Último acceso: 2020].
- [5 Britannica, «Roasting, smelting, and converting,» [En línea]. Available: 1] <https://www.britannica.com/technology/copper-processing/Roasting-smelting-and-converting>. [Último acceso: 2020].
- [5 Consejo Minero, «Buenas Prácticas: Tostación en lecho fluidizado,» [En línea]. Available: 2] <https://i.ytimg.com/vi/8LCdB8sYqOg/maxresdefault.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [5 Minería Chilena, «Fundiciones de cobre en Chile,» [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2018/10/Foto1\\_Caletones.jpg](https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2018/10/Foto1_Caletones.jpg). [Último acceso: 2020]. 3]
- [5 Nueva Minería y Energía, «Fundición de Concentrados de Chuquicamata lleva adelante cinco 4] proyectos de mejora,» [En línea]. Available: <https://www.nuevamineria.com/revista/fundicion-de-concentrados-de-chuquicamata-lleva-adelante-cinco-proyectos-de-mejora/>. [Último acceso: 2020].
- [5 Minería Chilena, «Innovación permite reducir generación de scrap durante la electrorrefinación,» 5] [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2014/05/earless-1-ok-620x403.jpg>. [Último acceso: 2020].
- [5 Singh, «New trends in drilling and blasting technology,» *International Journal of Surface Mining,* 6] *Reclamation and Environment*, pp. 305-315, 2000.
- [5 Babaei Khorzoughi Mohammad y Hall Robert, «Processing of measurement while drilling data 7] for rock mass,» *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016.

- [5 G. N. Moraga Hidalgo, «Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la 8] tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería de rajo abierto,» Concepción, Chile, 2018.
- [5 Ingeopres, «Perforación y Voladuras,» España, 2011.  
9]
- [6 J. Bernaola, J. Castilla y J. Herrera, «Perforación y voladura de rocas en minería,» Departamento 0] de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Madrid, 2013.
- [6 Greg Adel, Toni Kojovic y Darren Thornton, «Mine-to-Mill Optimization of Aggregate 1] Production,» 2006.
- [6 J.B. Segui y M. Higgings, «Blast design using measurement while drilling parameters,» *Fragblast: 2] International Journal for Blasting and Fragmentation*, pp. 287-299, 2002.
- [6 Lei Ge, Long Quan, Xiaogang Zhang, Zhixin Dong y Jing Yang, «Power matching and energy 3] efficiency improvement of hydraulic excavator driven with speed and displacement variable power source,» *Chinese journal of mechanical engineering*, 2019.
- [6 Kwame Awuah-Offei, «Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of 4] operators in loading and hauling operations,» USA, 2016.
- [6 G. Rojas, «Introducción de un LHD híbrido a la industria minera y sus posibilidades en el mercado 5] chileno,» Santiago de Chile, 2017.
- [6 R. Solorzano, «Caterpillar impacta con su excavadora híbrida,» 2016. [En línea]. Available: 6] <https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-en-espanol/article/21886621/caterpillar-impacta-con-su-excavadora-hbrida#:~:text=La%20tecnolog%C3%ADa%20h%C3%ADbrida%20es%20sin%C3%B3nimo,combusti%C3%B3n%20suplementado%20por%20potencia%20el%C3%A9ctrica.&text=Aug%20>
- [6 «Revista Maquinaria Pesada,» 2013. [En línea]. Available: 7] <http://revistamakinariapesada.com/caterpillar-entrego-su-primera-excavadora-hibrida-en-bauma-2013/>. [Último acceso: 2020].
- [6 E. Cornejo, «Sistema de optimización de transporte para la mediana minería,» Chile, 2013.  
8]
- [6 A. Moradi Afrapoli y H. Askari-Nasab, «Mining fleet management systems: a review of models 9] and algorithms,» *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017.
- [7 Minería Chilena, «El caso de Trolley Assist,» 2012. [En línea]. Available: 0] <https://www.mch.cl/reportajes/el-caso-de-trolley-assist/>.
- [7 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-1\] aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#](https://www.mch.cl/2015/05/25/truck-trolley-un-1] aliado-en-el-ahorro-seguridad-y-sustentabilidad-de-las-faenas/#).

- [7 Mikhailov, «A potencial application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat 2] mining,» 2019.
- [7 Mohammad Reza Tavakoli Mohammadi, Seyed Ahmad Hashemi y Seyed Farhad Moosakazemi, 3] «Review of the in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case study in copper industry,» 2011.
- [7 M. Nehring y P. Knights, «A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing 4] and conveying, and truck/shovel systems,» 2017.
- [7 J. Tonge, «The implications of improved conveyor technology on In-Pit Crusher Conveyor 5] Systems,» 2017.
- [7 W. Loli Morales, «Metodología de planificación a cielo abierto considerando incorporación de 6] un pit crusher and conveyors,» Santiago de Chile, 2016.
- [7 K. Shah, «Construction, Working and Maintance of Crusher for Crushing Bulk Materials,» 2018. 7]
- [7 M. Moncada Merino, «Modelación dinámica no lineal de harnero vibratorio de harnero 8] vibratorio considerando inercia del mineral y fuerza del mineral sobre el harnero calculada con elementos discretos,» Concepción, 2017.
- [7 D. Escobar Moscoso, «Modelación numérica del comportamiento estructural de harnero 9] vibratorio R-MD, mediante acoplamiento entre el método de elementos finitos y elementos discretos,» 2016.
- [8 J. Saavedra Vidal, «Control de presión de agua mediante variador de frecuencia y motobomba,» 0] 2007.
- [8 Electro Industria, 2017. [En línea]. Available: 1] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000&ni=principio-de-funcionamiento-y-ventajas-de-los-vdf>. [Último acceso: 2020].
- [8 Vibra Screener, 2016. [En línea]. Available: [https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2\] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/](https://vibrascreener.com/4-ways-to-improve-the-2] efficiency-of-your-vibratory-screener-separators-and-sieves/).
- [8 Minería Chilena, 2015. [En línea]. Available: [https://www.mch.cl/reportajes/smg-ingenieria-3\] innovador-sistema-de-riego-para-biolixiviacion-en-pilas/](https://www.mch.cl/reportajes/smg-ingenieria-3] innovador-sistema-de-riego-para-biolixiviacion-en-pilas/).
- [8 M. Acuña Reyes y A. Arancibia Reyes, «Patentscope,» 2013. [En línea]. Available: 4] <https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2013049953>.
- [8 Minería Chilena, «Innovador proyecto permite a Radomiro Tomic ahorrar hasta 80% en uso de 5] agua,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.mch.cl/2018/07/17/innovador-proyecto-permite-a-radomiro-tomic-ahorrar-hasta-80-en-uso-de-agua/>.
- [8 Expande, «Casos de innovación de proveedores en la minería chilena,» 2018. 6]

[8 Fenercom, «Guía de buenas prácticas en el aislamiento industrial,» 2017.  
7]

[8 USAID, «Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor,» 2011.  
8]

[8 Agencia de Sostenibilidad Energética, «Guía para calificación de consultores en Eficiencia  
9] Energética,» 2011.