



MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER
Nuevas tecnologías para
paliar el uso de materiales escasos
en baterías de litio

Autor: Álvaro Leis Hombre
Director: Enrique Espí Guzmán

Madrid
2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Nuevas tecnologías para paliar el uso de materiales escasos en baterías de litio
en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Álvaro Leis Hombre

Fecha: ...28.../ ...08.../ ...2024...

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Enrique Espí Guzmán

Fecha: 30 / ...08.../ ...2024...



MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER
**Nuevas tecnologías para
paliar el uso de materiales escasos
en baterías de litio**

Autor: Álvaro Leis Hombre
Director: Enrique Espí Guzmán

Madrid
2024

NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA PALIAR EL USO DE MATERIALES ESCASOS EN BATERÍAS DE LITIO

Autor: Leis Hombre, Álvaro

Director: Espí Guzmán, Enrique

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es recopilar y organizar la información que comprende la situación actual sobre las baterías de litio, concretamente, las tecnologías necesarias para su reciclaje y para satisfacer la futura demanda que se prevé del mineral como resultado de las políticas de transición energética.

El TFM se divide en tres principales partes. En la primera, a modo de introducción, se plantea el problema analizando la oferta actual de litio y la demanda tanto actual como futura del mineral y se concluye en la necesidad de explorar nuevas tecnologías para satisfacer dicha demanda. En la segunda, se explican tanto los métodos tradicionales de obtención del litio utilizados a escala industrial como nuevas tecnologías a escala de laboratorio. Con ello, se podrá observar que el proceso químico más importante en la captación del mineral es la lixiviación. Así pues, se terminará el proyecto con una tercera parte, dónde se tratará con mayor profundidad esta etapa, concretamente la biolixiviación.

Palabras clave: litio, extracción directa, transición energética, reciclaje, baterías de ion de litio, biolixiviación, biominería.

NEW TECHNOLOGIES TO MITIGATE THE USE OF SCARCE MATERIALS IN LITHIUM BATTERIES

Author: Leis Hombre, Álvaro

Supervisor: Espí Guzmán, Enrique

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The aim of this project is to collect and organise information comprising the current situation on lithium batteries, specifically, the technologies needed to recycle them and to meet the expected future demand for the mineral as a result of energy transition policies.

The TFM is divided into three main parts. The first, by way of introduction, sets out the problem by analysing the current supply of lithium and the current and future demand for the mineral and concludes on the need to explore new technologies to meet this demand. The second section explains both the traditional methods of obtaining lithium used on an industrial scale and new technologies on a laboratory scale. In this way, it will be seen that the most important chemical process in the capture of the mineral is leaching. Thus, the project will end with a third part, where this stage, specifically bioleaching, will be dealt with in greater depth.

Keywords: lithium, direct extraction, energy transition, recycling, lithium-ion batteries, bioleaching, biomining.

Contenido

1. Introducción	2
2. Motivación y objetivos del proyecto	2
3. Metodología de Trabajo	2
PRIMERA PARTE: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
4. Definición del problema	5
5. Aplicaciones del litio	6
6. Baterías de litio	8
7.1. Funcionamiento	8
7.2. Tipos de baterías de litio según su composición y uso	9
7. Oferta actual de litio	11
8. Principales productores	12
9.1. AUSTRALIA	13
9.2. CHILE	13
9.3. CHINA	13
9.4. ARGENTINA	14
9.5. BRASIL	14
9.6. ZIMBABUE	14
9.7. CANADÁ	15
9.8. PORTUGAL	15
9.9. EE. UU.	15
10. Perspectivas de demanda del litio en el futuro	16
SEGUNDA PARTE: POSIBLES SOLUCIONES	19
11. Extracción Directa del Litio (EDL)	20
11.1. Extracción tradicional de litio en salmueras	22
11.2. Métodos de EDL	23
11.2.1. Adsorción	23
11.2.2. Intercambio iónico	24
11.2.3. Extracción con disolventes	25
11.2.4. Separación con membranas	26
11.2.5. Separación electroquímica	26
12. Reciclaje de baterías de ion de litio	28
12.1. Reciclaje de baterías de litio a escala industrial	28
12.2. Técnicas de reciclado a escala laboratorio	30
TERCERA PARTE: BIOLIXIVIACIÓN	32

13.	Recuperación de Li mediante lixiviación	33
13.1.	Lixiviación con ácidos inorgánicos.....	33
13.2.	Lixiviación con ácidos orgánicos	33
13.3.	Lixiviación bacteriana o biolixiviación	34
13.3.1.	Mecanismos de biolixiviación	34
13.3.2.	Métodos de biolixiviación	36
13.3.3.	Factores en la biolixiviación.....	37
13.4.	Bio-minería, una nueva aplicación de la biolixiviación	39
	Conclusiones	42
	ANEXOS	43
	Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas	44
	Bibliografía	45

1. Introducción

En el panorama industrial actual, en el que la transición energética hacia emisiones de gases de efecto invernadero cero, las baterías de litio desempeñan un papel clave en dispositivos que van desde teléfonos inteligentes hasta vehículos eléctricos. Sin embargo, la demanda de estas baterías ha crecido exponencialmente, lo que está generando una preocupación sobre la disponibilidad futura de materiales claves para su fabricación. Elementos como el cobalto, silicio, litio, manganeso y níquel son esenciales en la composición de baterías de iones de litio, pero su suministro no es ilimitado y está sujeto a limitaciones geopolíticas y ambientales, siendo calificados como “minerales críticos”.

Ante este desafío, analizando las formas de obtención actuales y la futura demanda, la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías han surgido como una respuesta para reducir la dependencia de las baterías de iones de litio de estos materiales escasos.

En este proyecto, se centrará en uno de estos “minerales críticos”; el litio, explicando el panorama actual, desde su oferta y demanda, hasta analizar posibles nuevas tecnologías para la obtención de litio desde la ingeniería de materiales hasta la innovación de los procesos de extracción.

2. Motivación y objetivos del proyecto

Como ya se ha mencionado antes, el uso de baterías de litio no sólo toma un papel muy importante en nuestras vidas hoy en día, sino que en un marco mundial de transición energética hacia emisiones de gases de efecto invernadero nulos, esta tecnología es y será cada vez más imprescindible. Adicionalmente, los impactos medioambientales y riesgos geopolíticos de las fuentes actuales de suministro, hace necesaria la búsqueda de fuentes de suministro alternativas y a fomentar el reciclado para lo que son necesarios nuevos desarrollos tecnológicos.

3. Metodología de Trabajo

Este proyecto consistirá en varios pasos. En primer lugar, se pondrá contexto al problema central, la creciente demanda de litio en los próximos años y la insuficiente capacidad actual de obtener el mineral. Se explicará brevemente las aplicaciones del litio, así como los métodos tradicionales de obtención: evaporación natural de salmueras y minería de rocas pegmatitas. Además, se explicará la situación actual geopolítica: dónde están los principales yacimientos, quiénes son los principales manipuladores y quiénes son los mayores compradores.

En segundo lugar, se compararán las anteriores mencionadas como alternativas formas de extracción de litio: las diferentes tecnologías de extracción directa y el reciclado de baterías de iones de litio.

En tercer lugar y último, se profundizará sobre la lixiviación, etapa principal de los procesos hidrometalúrgicos en el reciclaje de LIB, concretamente, en la biolixiviación que, en pocas palabras, consiste en la introducción de microorganismos para llevar a cabo este proceso. Además de explicar su uso en la extracción en los yacimientos y poner el foco en la posibilidad de su futuro uso para aumentar las cantidades extraídas de litio con la biominería.

PRIMERA PARTE: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4. Definición del problema

La creciente demanda de litio procedente de tecnologías emergentes, como las baterías de iones de litio utilizadas en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos, ha generado serias preocupaciones sobre la disponibilidad futura del recurso. El litio, un elemento clave en la fabricación de estas baterías, está disponible en cantidades limitadas en la corteza terrestre y se concentra en unos pocos países, lo que plantea desafíos tanto en términos de suministro como de acceso.

Las incertidumbres sobre el suministro de litio se ven alimentadas aún más por el rápido crecimiento del mercado de vehículos eléctricos, impulsado por regulaciones ambientales más estrictas y un cambio hacia un transporte más sostenible. Se espera que la demanda de este metal aumente significativamente en los próximos años (hasta 42 veces más en 2040 en comparación a 2020 según la Agencia Internacional de la Energía, *Ilustración 1*), lo que podría restringir la oferta y aumentar los precios, impactando la viabilidad y escalabilidad de la electrificación del transporte.[1]

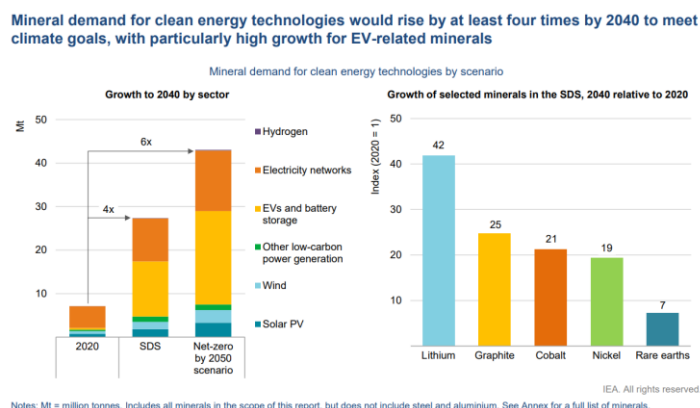


Ilustración 1: Perspectiva de futura demanda de algunos de los denominados materiales críticos. Fuente [1]

La extracción y procesamiento del litio, además de su escasez limitada, presenta problemas ambientales y sociales, como la degradación del medio ambiente y las tensiones en las comunidades locales donde se encuentran las reservas de litio. Estos desafíos resaltan la importancia de desarrollar soluciones novedosas que aborden tanto la escasez de litio como sus efectos perjudiciales, al mismo tiempo que se fomenta la transición hacia una economía más circular y sostenible.

En resumen, para garantizar un suministro sostenible y responsable de litio, especialmente en sus aplicaciones tecnológicas y en la industria de los vehículos eléctricos, la escasez de litio plantea desafíos múltiples y complejos.

5. Aplicaciones del litio

El litio es un elemento químico muy versátil que se utiliza en una amplia gama de industrias para una variedad de propósitos. Lo hace valioso en muchos campos debido a su única combinación de propiedades físicas y químicas. Aquí se presentan algunas de las principales áreas actuales de uso del litio:[2]

1. Una de las aplicaciones más populares del litio en la actualidad son las **baterías de iones de litio (Li-ion)**. Debido a su alta densidad de energía, larga vida útil y capacidad de recarga, las baterías de Li-ion son ampliamente utilizadas en dispositivos electrónicos portátiles como teléfonos inteligentes, tabletas, computadoras portátiles y cámaras digitales. Debido al aumento del mercado de vehículos eléctricos, las baterías de Li-ion se están volviendo cada vez más populares debido a su alta eficiencia y baja contaminación.
2. **Aleaciones de litio:** El litio se utiliza para crear una variedad de aleaciones metálicas que se utilizan en las industrias de la construcción, la automoción y el aeroespacial. Por ejemplo, las aleaciones de litio-aluminio se utilizan en la fabricación de componentes de aeronaves debido a su bajo peso y alta resistencia a la corrosión. De manera similar, las aleaciones de litio-magnesio se utilizan en la industria automotriz para aumentar la eficiencia del combustible y reducir el peso de los componentes.
3. **Productos de cerámica y vidrio:** el litio se utiliza como aditivo para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales. Por ejemplo, el carbonato de litio se usa para fabricar vidrios y cerámicas de baja expansión térmica, que se utilizan en aplicaciones de alta tecnología, como paneles solares y pantallas de cristal líquido (LCD).
4. **Industria farmacéutica:** El litio se utiliza en la producción de medicamentos psicotrópicos que tratan trastornos psiquiátricos como la depresión y el trastorno bipolar. Los compuestos de litio estabilizan el estado de ánimo y se usan junto con otros medicamentos para controlar los síntomas de estas condiciones.
5. **Industria metalúrgica:** Los procesos de electrólisis utilizan el litio para producir metales como el aluminio y el magnesio. Se utiliza también como reductor en la metalurgia del circonio y del titanio.

A continuación, se puede observar en porcentajes las principales aplicaciones del litio en 2015, ***¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..***

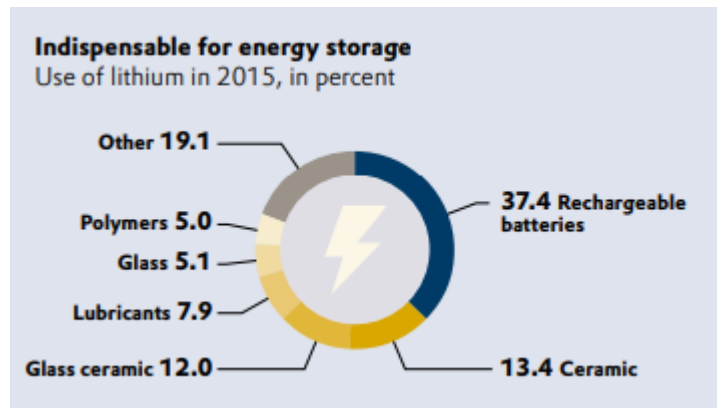


Ilustración 2: Aplicaciones del litio en 2015

En resumen, debido a sus propiedades únicas, el litio tiene una amplia gama de aplicaciones en una variedad de industrias. El litio juega un papel importante en la economía moderna y en el desarrollo de tecnologías avanzadas, desde el almacenamiento de energía en baterías hasta la fabricación de aleaciones metálicas y productos cerámicos. A medida que avancen las tecnologías y se busquen soluciones para los desafíos energéticos y ambientales actuales, su importancia continuará creciendo. Este proyecto se centrará en este elemento y en la problemática que presenta su escasez y cómo afectará a las baterías.

6. Baterías de litio

La comercialización de las baterías de litio inicia en el año 1991 y desde entonces han tenido un rápido crecimiento en sus ventas. La creciente preferencia por vehículos híbridos y eléctricos libres de contaminación junto con los rápidos desarrollos tecnológicos, son algunos de los factores que han influido en la penetración en el mercado de este tipo de baterías. Esta situación se observa en las ventas de baterías en Japón para el año 2018, donde del 57% de baterías no recargables vendidas, el 18% corresponde a baterías de litio. En el caso de las baterías recargables del 43% de las ventas, el 31% corresponde a baterías de litio.[3]

El auge en el uso de las baterías de litio se debe principalmente a su alta densidad de energía, su alta eficiencia energética y a su prolongado tiempo de vida. Por ejemplo, comparado con las baterías de ácido plomo la densidad de energía en las baterías de iones de litio puede triplicarse. Por otro lado, las baterías de iones de litio pueden alcanzar un máximo de 1000 ciclos de operación mientras que las de Ni-MH un máximo de 500 ciclos. Si se realiza una comparación de la eficiencia energética de las baterías de ácido plomo, Ni-MH y baterías de iones de litio su comportamiento es similar.[4]

7.1. Funcionamiento

Una batería puede estar compuesta por dos o más celdas conectadas en serio o en paralelo. Una celda es la unidad básica de una batería capaz de convertir energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas. Las baterías constan de cuatro partes fundamentales que son el ánodo, el cátodo, el separador y el electrolito (*Ilustración 3*). El ánodo sufre una reacción de oxidación durante el proceso de descarga mientras que en el proceso de carga sufre una reacción de reducción. Para el caso de cátodo tenemos una reacción de reducción durante el proceso de descarga y una reacción de oxidación durante el proceso de carga.[2]

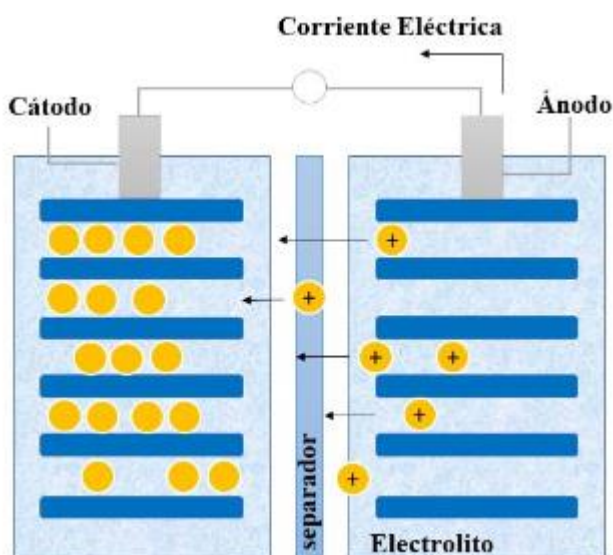


Ilustración 3: Partes de una batería

Durante la reacción de oxidación se presenta una pérdida de electrones mientras que en la reacción de reducción se tiene una ganancia de electrones. Ambas reacciones se complementan y podemos encontrar ejemplos de ellas en diversas actividades que se realizan diariamente como lo son la combustión de la gasolina y el proceso de respiración.

La selección del material a utilizar en el ánodo y cátodo de la batería juega un papel relevante en el rendimiento de esta. Es por ello que la selección del material del ánodo se hace considerando las características de eficiencia como agente reductor, buena conductividad, estabilidad, bajo costo y fácil implementación, mientras que el material del cátodo se selecciona considerando que sea un eficiente agente oxidante, tenga estabilidad al contactar al electrolito y que maneje una tensión de trabajo.

7.2. Tipos de baterías de litio según su composición y uso

Las baterías de litio se pueden clasificar en diferentes tipos según su composición química y su aplicación. Aquí tienes algunos de los tipos más comunes:[5]

- **Baterías de iones de litio (Li-ion):**
 - **Composición:** Los iones de litio se mueven entre un ánodo de grafito y un cátodo compuesto de óxidos de litio y otros metales, como hierro, cobalto, níquel o manganeso.
 - **Uso:** Son comunes en teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, cámaras digitales y vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía.
- **Baterías de polímero de litio (LiPo):**
 - **Composición:** Las baterías de polímero de litio usan un electrolito sólido o gelificado en lugar de un electrolito líquido como las baterías de Li-ion.
 - **Uso:** Se utilizan en teléfonos inteligentes, tabletas y otros dispositivos electrónicos portátiles donde el diseño delgado y flexible es crucial.
- **Baterías de fosfato de litio hierro (LiFePO₄):**
 - **Composición:** El fosfato de litio de hierro como material de cátodo de estas baterías las hace más seguras y menos propensas a la combustión que otros tipos de baterías de litio.
 - **Uso:** Son utilizados en aplicaciones donde la seguridad es importante, como vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento de energía y equipos médicos.
- **Baterías de titanato de litio (LTO):**
 - **Composición:** Las baterías de titanato de litio, en lugar de grafito, tienen más vida útil, capacidad de carga rápida y seguridad.
 - **Uso:** Aplicaciones que requieren altas tasas de carga y descarga, como vehículos eléctricos de alto rendimiento, sistemas de almacenamiento de energía y aplicaciones industriales, las utilizan.
- **Baterías de litio-aire (Li-air):**

- **Composición:** Estas baterías tienen una densidad de energía teórica mucho mayor que otras baterías de litio porque utilizan oxígeno del aire como reactivo en el cátodo.
- **Uso:** Debido a su alta densidad de energía, las baterías de litio-aire tienen el potencial de revolucionar la industria de la energía, aunque todavía están en desarrollo y no se utilizan con frecuencia en aplicaciones comerciales.

Estos son solo algunos ejemplos de los diferentes tipos de baterías de litio que se pueden encontrar en el mercado, cada uno de los cuales tiene sus propias características, beneficios y desventajas. El tipo de batería correcto depende de la aplicación y el rendimiento del dispositivo o sistema.

7. Oferta actual de litio

El litio se extrae a partir de tres tipos de yacimientos:[6]

- **Salmueras:** representan alrededor del 66% de los recursos de litio a nivel mundial y se encuentran principalmente en las salinas de Chile, Argentina, China y el Tíbet. Hay tres tipos de depósitos de salmuera: continental, geotérmicas y campos petrolíferos.
- **Pegmatitas:** roca ígnea intrusiva de grano grueso formado a partir de magma cristalizado en el interior de la corteza terrestre. Representa el 26% de los recursos mundiales conocidos de litio.
- **Rocas sedimentarias:** representan el 8% de los recursos mundiales de litio y se encuentran en depósitos de arcilla y en rocas evaporitas lacustres.

Si bien es cierto el litio se encuentra presente tanto en pegmatitas, salmueras y rocas sedimentarias, en la actualidad existen solo 2 procesos de obtención económicamente factibles:

- **Obtención a partir de pegmatitas:**

La espodumena fue la fuente principal de obtención de carbonato de litio hasta que se inició la explotación del litio contenido en salmueras naturales. El mineral espodumena se concentra por flotación diferencial para obtener un concentrado con un contenido de 2.5 a 3.2% de litio, lo que equivale a 85 a 95% de espodumena.

Para la producción de litio de la espodumena natural, el concentrado de este debe ser calcinado previamente con caliza, para posteriormente y mediante procesos de molienda, lixiviación, precipitaciones sucesivas, entre otros, y dependiendo del agente tratante, se pueda extraer un alto porcentaje del litio, produciendo hidróxido de litio, carbonato de litio o cloruro de litio.

- **Obtención a partir de salmueras:**

Este proceso constituye el método con los costes más bajos de obtención de litio. La salmuera es bombeada a los estanques de baja profundidad y de dimensiones considerables, en los cuáles, a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a precipitar secuencialmente un conjunto de sales. De este modo, se extraen sales tales como cloruro de potasio, cloruro de sodio, sulfato de potasio, sulfato de sodio, entre otras, así como de litio, las cuales presentan impurezas de magnesio, boro y sulfato.

Posteriormente, la salmuera concentrada de litio es transportada por camiones a las plantas de procesamiento, donde es sometida a procesos de purificación y precipitación a modo de obtener carbonato de litio, con una pureza cercana al 99,5%, aunque el mercado exige un mínimo de 99,1%, que puede comercializarse en cristales o se compacta para ser vendido en forma de gránulos. El carbonato de litio puede ser la materia prima para la producción de hidróxido de litio o bien de cloruro de litio de alta pureza que se emplea en la obtención de litio metálico por electrólisis de sales fundidas.

8. Principales productores

Los datos más recientes del Servicio Geológico de EE. UU. muestran que los principales países productores de litio del mundo están haciendo todo lo posible para satisfacer la creciente demanda de almacenamiento de energía y vehículos eléctricos; de hecho, la producción mundial de litio aumentó considerablemente de 2022 a 2023, llegando a 180 000 toneladas métricas. (T), véase Ilustración 4 (sin incluir la producción de EE. UU.).[7]

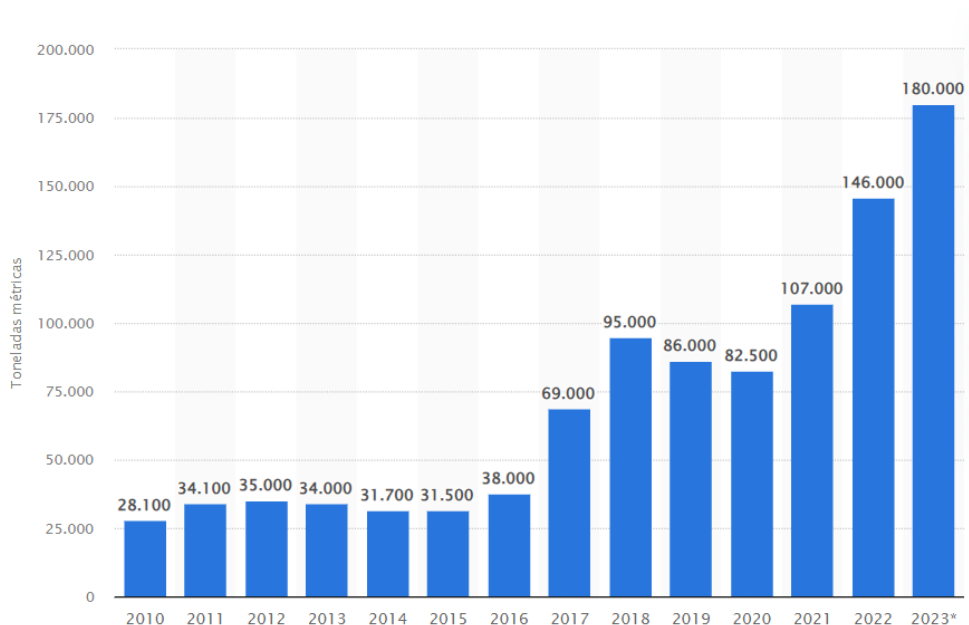


Ilustración 4: Producción en las minas de litio a nivel mundial desde 2010 hasta 2023. Fuente [7]

A continuación, se explicará los principales productores de litio en el mundo, sus yacimientos y futuros proyectos para obtener una mayor explotación del mineral (Ilustración 5).[8]

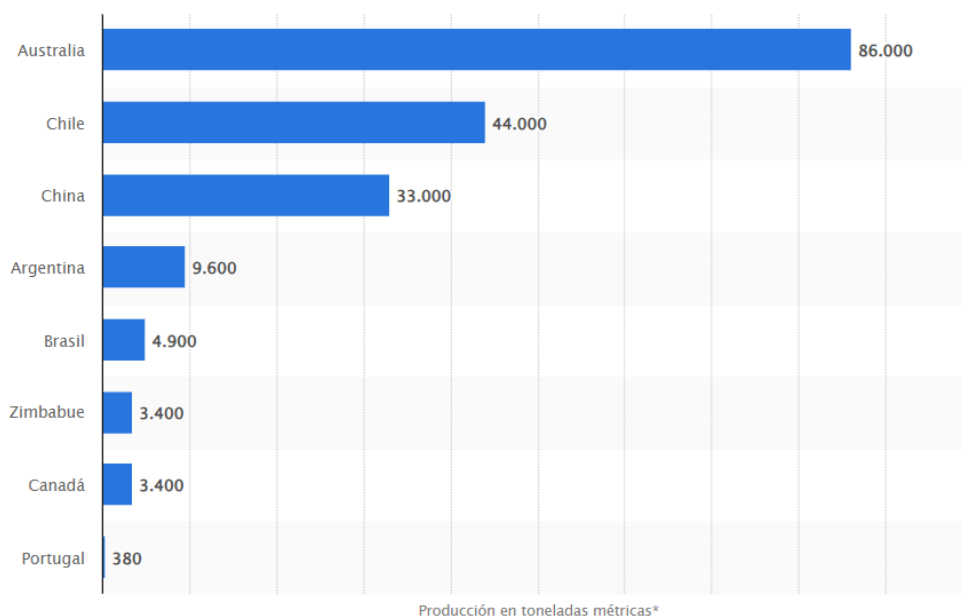


Ilustración 5: Ranking de los principales países productores de litio a nivel mundial en 2023. Fuente [8]

9.1. AUSTRALIA

Producción mina: 86000 T

Produjo 86000 T de contenido de litio el año pasado, frente a las 61.000 T del año anterior. *GlobalData* pronostica que la producción de litio de Australia aumentará a una tasa de crecimiento anual compuesta del 14,2 por ciento para llegar a 116240 T en 2026 a medida que las minas expandan la producción para satisfacer la demanda.

Australia alberga el activo de litio Greenbushes, que es operado por *Talison Lithium*[9], una subsidiaria que es propiedad conjunta de las principales mineras *Tianqi Lithium* y *Albemarle*. Greenbushes es el área minera en funcionamiento continuo más antigua de Australia Occidental, habiendo estado en funcionamiento durante más de 25 años.

Australia también posee más de 3,8 millones de toneladas de reservas de litio identificadas que cumplen con JORC, según el Servicio Geológico de EE. UU., que lo coloca detrás de Chile. Vale la pena señalar que la mayor parte del suministro de litio del país se exporta a China como espodumena.

9.2. CHILE

Producción mina: 44000 T

Chile fue otro de los principales productores de litio en 2023[10], y su producción aumentó desde 39.000 T. A diferencia de Australia, donde el litio se extrae de minas de roca dura, el litio de Chile se encuentra en depósitos de salmuera de litio.

El Salar de Atacama en Chile genera aproximadamente la mitad de los ingresos de *SQM*, uno de los principales productores de litio. El Salar de Atacama es también el hogar de otro importante productor de operaciones de salmuera de litio: *Albemarle*, con sede en EE. UU. Sin embargo, en abril de 2023, Chile sorprendió a los participantes del mercado al anunciar planes para nacionalizar su industria del litio. Aunque no haya sucedido, la medida eventualmente transferirá las operaciones de empresas como *SQM* y *Albemarle* a una entidad estatal.

9.3. CHINA

Producción mina: 33000 T

China ocupó el tercer lugar en producción de litio en 2023. Si bien la producción de litio en China es comparativamente baja, es el mayor consumidor de litio debido a sus industrias de fabricación de productos electrónicos y vehículos eléctricos. También produce más de las tres cuartas partes de las baterías de iones de litio del mundo y controla la mayoría de las instalaciones de procesamiento de litio del mundo. Actualmente, China obtiene la mayor parte de su litio de Australia, pero está buscando expandir su capacidad.

9.4. ARGENTINA

Producción mina: 9600 T

Es bien sabido que Bolivia, Argentina y Chile forman el Triángulo del Litio. El distrito Salar del Hombre Muerto de Argentina alberga importantes salmueras de litio, y sus reservas son suficientes para al menos 75 años.

En la actualidad, la minería de litio en el país no muestra signos de desaceleración. Dos operaciones de salmuera están actualmente en producción y 13 proyectos están en desarrollo, con varios otros en proceso.

9.5. BRASIL

Producción mina: 4900 T

La producción de litio en Brasil ha despegado en los últimos años, catapultándolo a la lista de los principales países productores de litio.

La producción de litio de Brasil disminuyó durante el COVID-19, pero 2022 fue un año de recuperación, con una producción total de 2200 T en comparación con las 1700 T de 2021.

El gobierno de Brasil planea invertir más de 2100 millones de dólares estadounidenses para 2030 en la expansión de la capacidad de producción de litio del país. Se espera que empresas como *Sigma Lithium*[11] y *AMG Critical Materials*[12] de Noruega se sumen a la producción.

9.6. ZIMBABUE

Producción mina: 3400 T

Aunque lo más llamativo son las reservas totales en Zimbabwe, que ascienden a 220000 T, según el Servicio Geológico de EE. UU.

Sinomine Resource Group de China adquirió recientemente el único productor de litio del país, que supuestamente posee el depósito de litio más grande conocido del mundo con más de 11 millones de toneladas. La empresa tiene planes de invertir 200 millones de dólares estadounidenses para expandir la capacidad de producción de la mina en otros 2 millones de TM por año; la inversión también le permitirá producir espodumena de litio.

En diciembre de 2022, Zimbabwe prohibió la exportación de litio en bruto en un esfuerzo por desarrollar la capacidad nacional para procesar litio de grado de batería a nivel nacional. La prohibición excluye a las empresas que ya están desarrollando minas o plantas de procesamiento en Zimbabwe.

9.7. CANADÁ

Producción mina: 3400 T

Si bien Canadá alberga una gran cantidad de depósitos de espodumena de roca dura y recursos de salmuera de litio, gran parte sigue sin desarrollarse y el país es un importador neto de litio. En un esfuerzo por hacer crecer una sólida cadena de suministro de litio en América del Norte para la industria de las baterías, el gobierno canadiense invirtió recientemente 27 millones de dólares canadienses en *E3 Lithium*[13], una empresa de tecnología y recursos de litio con sede en Alberta.

9.8. PORTUGAL

Producción mina: 380 T

La mayor parte del litio de la nación europea proviene del campo de aplita-pegmatita Gonçalo. A pesar de la producción comparativamente baja de este país productor de litio, las reservas de litio de Portugal se sitúan en 60000 T.

9.9. EE. UU.

Producción minera: retenida

En el último lugar de esta lista de los principales países productores de litio se encuentra EE. UU., que ha ocultado las cifras de producción para evitar la divulgación de datos de propiedad de la empresa. Su única producción el año pasado provino de dos operaciones: una operación de salmuera con sede en Nevada, muy probablemente en Clayton Valley, que alberga la mina Silver Peak de Albemarle, y los relaves de desecho de salmuera de *US Magnesium*, con sede en Utah, el mayor productor primario de magnesio en Norte América.

Hay unos cuantos proyectos importantes de litio en curso en los EE. UU., incluido el proyecto de piedra arcillosa de litio Thacker Pass de *Lithium Americas*, el proyecto de litio de roca dura de *Piedmont Lithium* y el proyecto de litio de roca dura de Standard Proyecto de salmuera de litio Arkansas Smackover de *Lithium*.

10. Perspectivas de demanda del litio en el futuro

Siguiendo la idea del punto anterior, es una buena noticia el crecimiento considerable en términos de producción de litio a nivel global en los últimos años. Sin embargo, es necesario preguntarse si siguiendo esta tendencia, se satisfará la demanda de litio prevista. Para ello, se aprovechará de los diferentes escenarios planteados por la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency, IEA)[14]

- **Escenario A:** Con los decretos en vigor actualmente.

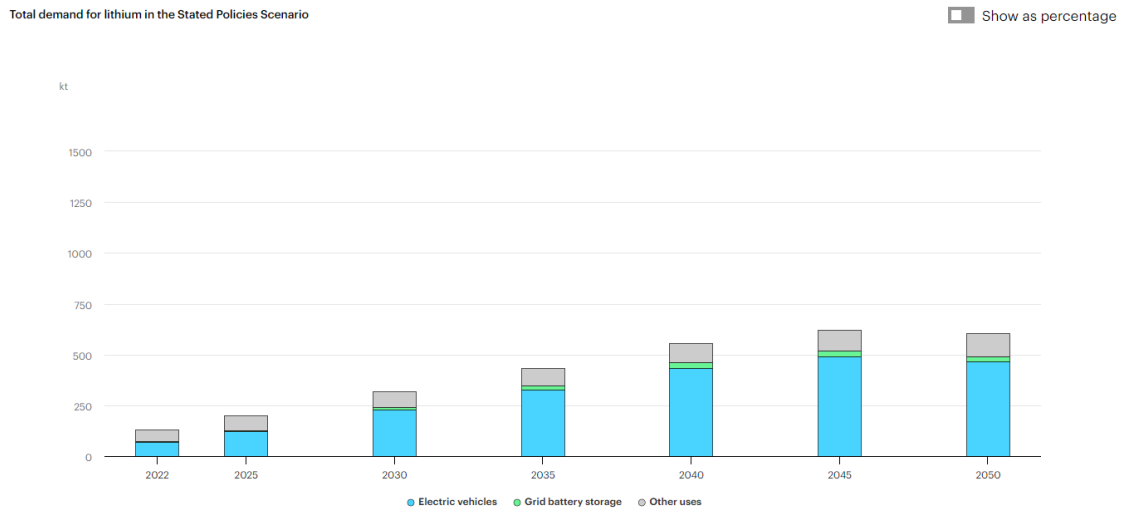


Ilustración 6: Demanda total de litio con las políticas actuales. Fuente[14]

- **Escenario B:** Con las políticas anunciadas, pero no aplicadas.

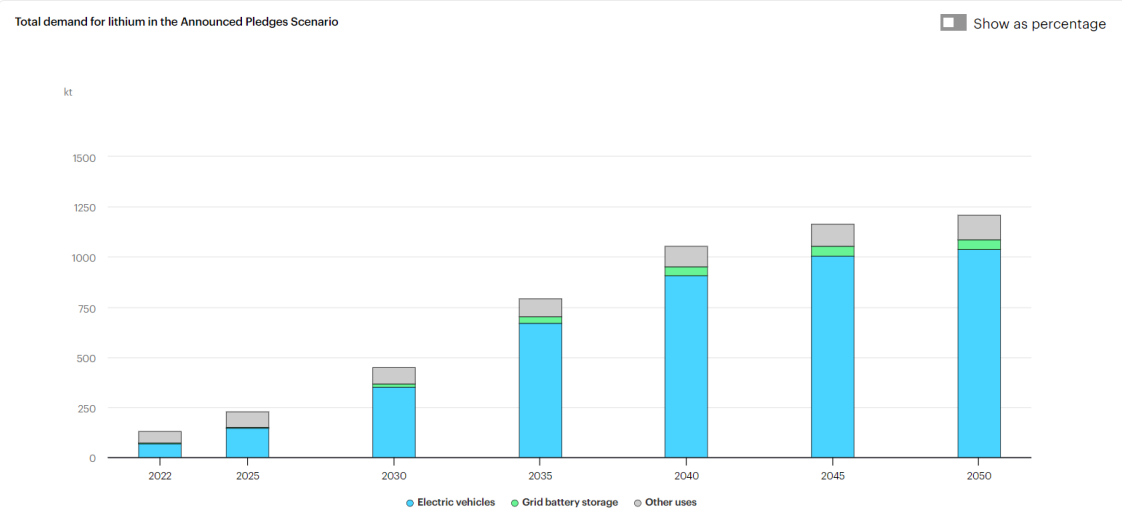


Ilustración 7: Demanda total de litio con las políticas anunciadas. Fuente [14]

- **Escenario C:** Con las políticas necesarias para conseguir el objetivo Net Zero Emissions by 2050

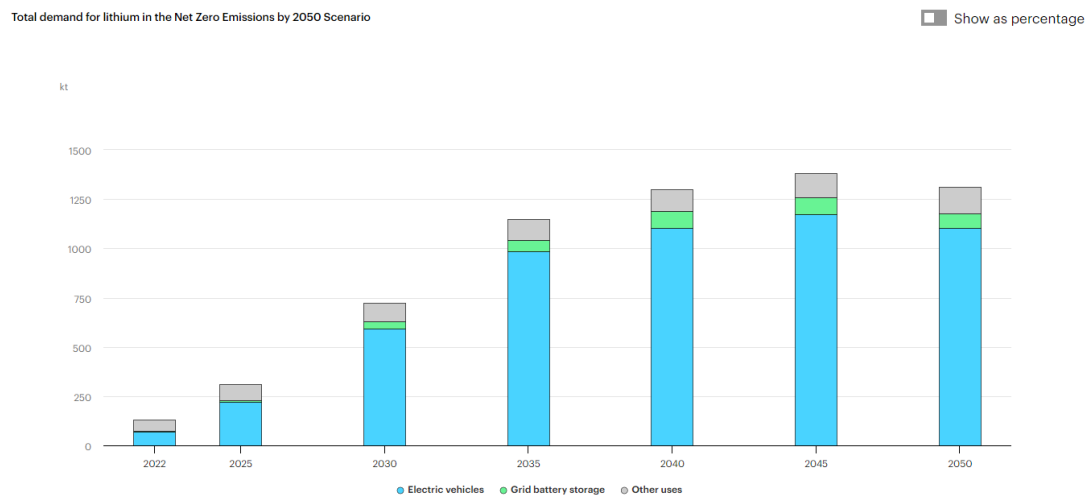


Ilustración 8: Demanda total de litio con las políticas necesarias para Net Zero Emissions by 2050. Fuente [14]

A su vez, la demanda se encuentra diferenciada para las diferentes aplicaciones del litio. De acuerdo con los apartados anteriores, el principal uso del litio es para las baterías de los coches eléctricos hacia una movilidad totalmente no dependiente de los combustibles fósiles.

Planteados los escenarios futuros de demanda y analizando la producción en los últimos años, se ha decidido estimar un crecimiento conservador anual en ésta del 10%, en la última década ha crecido un 19%. A continuación, se encuentra una gráfica comparativa de la producción frente a los diferentes escenarios de demanda.

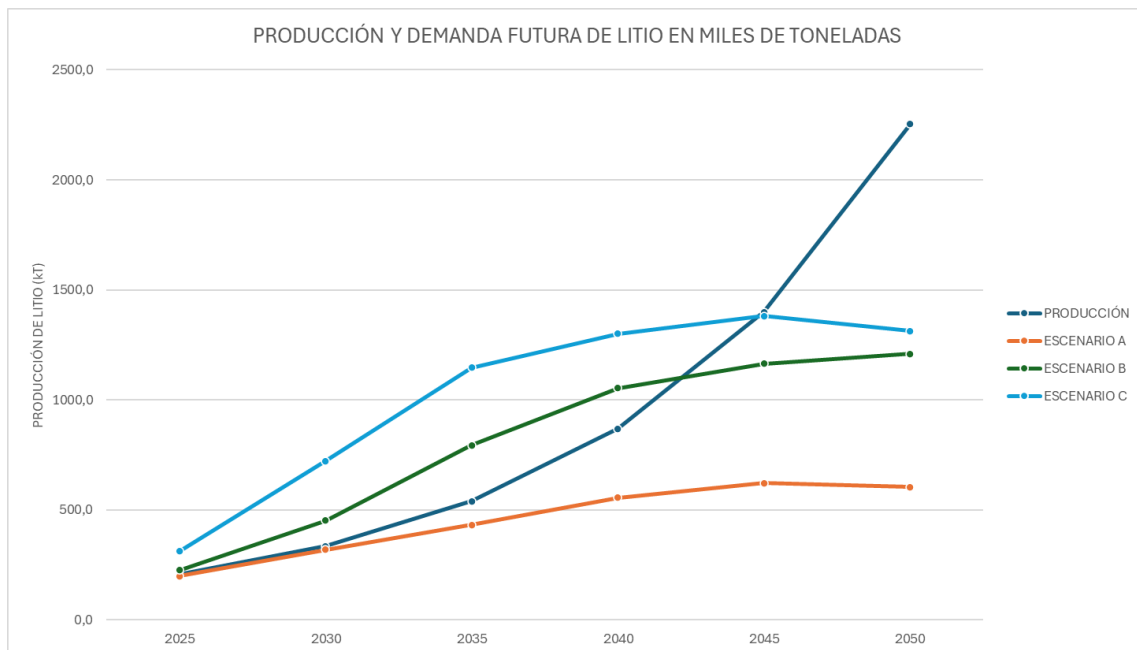


Ilustración 9: Producción y demanda futura de litio en miles de toneladas. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar la producción en el futuro próximo solo satisfaría la demanda del escenario A, es decir, con las políticas actuales. Por otro lado, se ha estimado un crecimiento anual del 10% pero, analizando la crisis del COVID en 2020, y los actuales conflictos internacionales, es fácil decir que este crecimiento puede que no se produzca de manera continua y estable en los años venideros.

Con todo ello, se puede concluir que es necesario el planteamiento de nuevas formas de producción de litio.

La primera idea sería continuar con la minería, de ahí que se tenga que hablar de reservas. En la siguiente gráfica (*Ilustración 10*) se tiene una aproximación de la cantidad de litio en miles de toneladas y dónde se encuentra.[15]

Ranking de los países con mayores reservas de litio en 2023

(en miles de toneladas métricas)

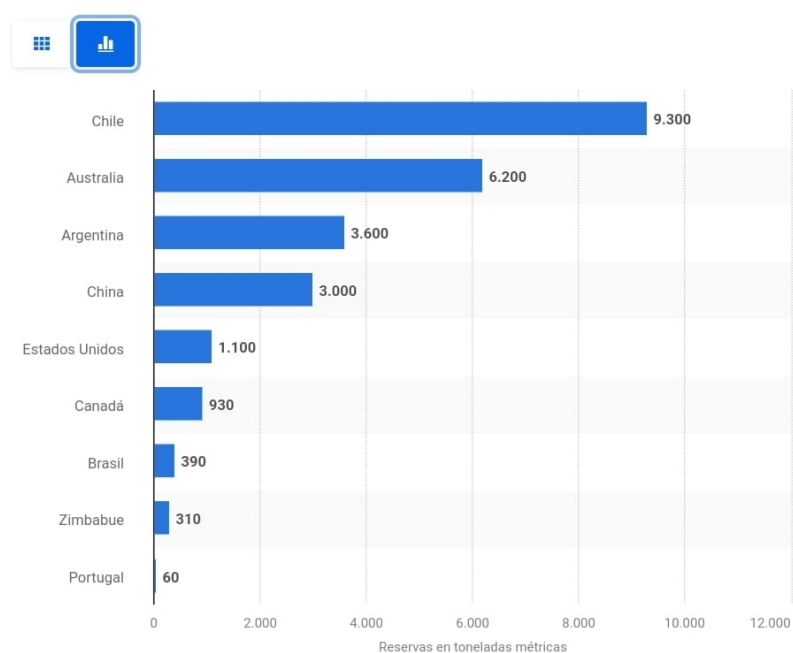


Ilustración 10: Ranking de los países con mayores reservas de litio en 2023. Fuente [15]

Sin embargo, los métodos actuales de extracción de litio son lentos, y no muy beneficiosos para el medio ambiente. De ahí que en los siguientes apartados se tratarán posibles nuevas tecnologías, además del reciclado.

SEGUNDA PARTE: POSIBLES SOLUCIONES

11. Extracción Directa del Litio (EDL)

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, la obtención actual del litio se resume en dos procesos: minería de pegmatitas y la evaporación natural de salmueras. La extracción de pegmatitas es un proceso simple, pero tiene un costo y un impacto ambiental negativo mientras que la evaporación de salmueras es lenta y produce residuos. [16]

En los últimos años se ha extendido el desarrollo de métodos de obtención de sales de litio alternativos a estas tecnologías, estos son los denominados métodos de extracción directa de litio (EDL).

Entre sus ventajas se encuentra una reducción considerable del tiempo de extracción, que es de horas en lugar de los 12 a 18 meses requeridos por la evaporación. Otro aspecto importante es la disminución en el volumen de salmuera tratado y por tanto, de superficie terrestre necesaria. Actualmente y a concentraciones típicas de 500 a 1000 mg por litro de litio para extraer una tonelada de litio, se deben evaporar entre 1000 y 2000 metros cúbicos de salmuera.

Los métodos EDL, además de rápidos, tienen menos consumo de agua; no dependen de condiciones climáticas ni de la composición de la salmuera, tienen alto rendimiento (70-90%) y, en general, tienen menor efecto sobre el medio ambiente. A continuación, se muestra una tabla comparativa entre los diferentes métodos tradicionales de obtención de litio y los nuevos EDL (*Tabla 1*).

Método de extracción	Pegmatitas	Salmuera	
	Minería	Evaporación	EDL
Tiempo de extracción	Semanas a meses	Meses a años	Horas a días
Lithium recovery rates	~60-80%	~40-60%	~70-90%
Costs			
Capex	Varía, según proceso	~US\$23-24,000/ T LCE*	~US\$26-34,000/ T LCE*
Opex		~US\$3,300-4,900/ T LCE*	~US\$2,800-3,600/ T LCE*
Procesos	Calentar, enfriar, triturar y tostar	Evaporación atmosférica	Adsorción, intercambio iónico, extracción con disolventes, separación con membranas
Necesidad de procesos complementarios	SÍ	NO	NO
Necesidad de superficie terrestre	ALTO	ALTO	BAJO
Dependiente del clima meteorológico	SÍ	SÍ	NO
Consumo de agua	ALTO	MEDIO-ALTO	BAJO-MEDIO
Consumo de energía	ALTO	BAJO	BAJO
Emisiones	ALTO	BAJO	BAJO

Tabla 1: Comparativa de los métodos de extracción de litio. Fuente [16]

*Nota: T LCE (tonelada de carbonato de litio equivalente) 1 tonelada de litio = 5 T LCE

Además, para hacerse una idea de la reducción significativa en el proceso de extracción de litio, es decir, desde su yacimiento natural hasta su punto de tratamiento, se adjunta la *Ilustración 11*, dónde se compara la evaporación natural y la EDL.

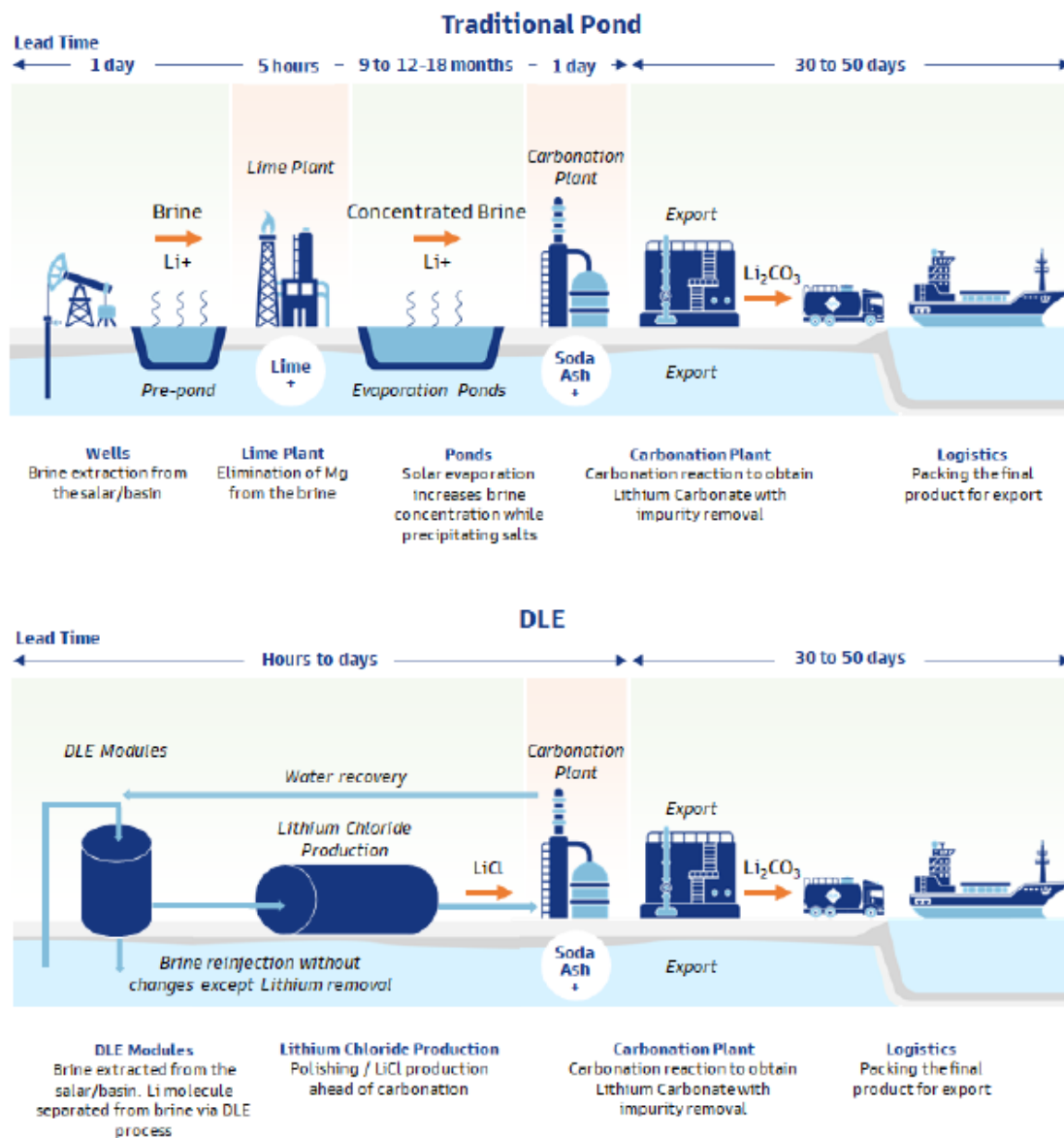


Ilustración 11: Extracción por salmueras tradicional vs EDL. Tiempos de cada etapa. Fuente [16]

Con ello, están surgiendo varias tecnologías DLE de eficacia demostrada que se están probando a gran escala, con un puñado de proyectos que ya se encuentran en fase de construcción comercial. Aunque todavía pueden surgir problemas relacionados con la escalabilidad y el consumo de agua y la reinyección de salmuera, con los esfuerzos en curso, la EDL podría implantarse entre 2025 y 2030, aumentando el suministro mundial de litio en bruto en un 8%.

11.1. Extracción tradicional de litio en salmueras

Como se ha podido observar en la tabla comparativa anterior (*Tabla 1*) los métodos de EDL surgen a partir de la necesidad de acelerar el proceso actual de extracción de litio mediante la evaporación natural de salmueras. Por ello, antes de explicar las diferentes tecnologías de EDL, es necesario entender la forma tradicional.

Una vez bombeada a la superficie, la salmuera de litio se distribuye a estanques de evaporación donde permanece de 9 a 12-18 meses (según el proyecto/las condiciones meteorológicas) hasta que la mayor parte del contenido de agua líquida se ha eliminado por evaporación solar. En algunos casos, se utiliza la ósmosis inversa para concentrar la salmuera de litio y acelerar el proceso de evaporación. Una vez que la salmuera de una balsa de evaporación ha alcanzado una concentración ideal de litio, se bombea a una instalación de recuperación de litio para su extracción mediante una serie de tratamientos y procesamientos.[16]

Ventajas

- Menor riesgo de implantación
- Menor consumo de energía (evaporación solar gratuita)
- Menor variedad de productos químicos utilizados en los reactivos

Inconvenientes

- Preocupaciones medioambientales (requisitos de superficie del terreno e incapacidad de reinyectar)
- Tiempo de comercialización lento
- Depende de las condiciones meteorológicas
- Como el litio tiene una concentración muy baja en la salmuera, se necesita un mayor volumen de agua para alcanzar valores de producción elevados.

A continuación, se muestra una representación gráfica del proceso descrito y de sus diferentes etapas (*Ilustración 12*):

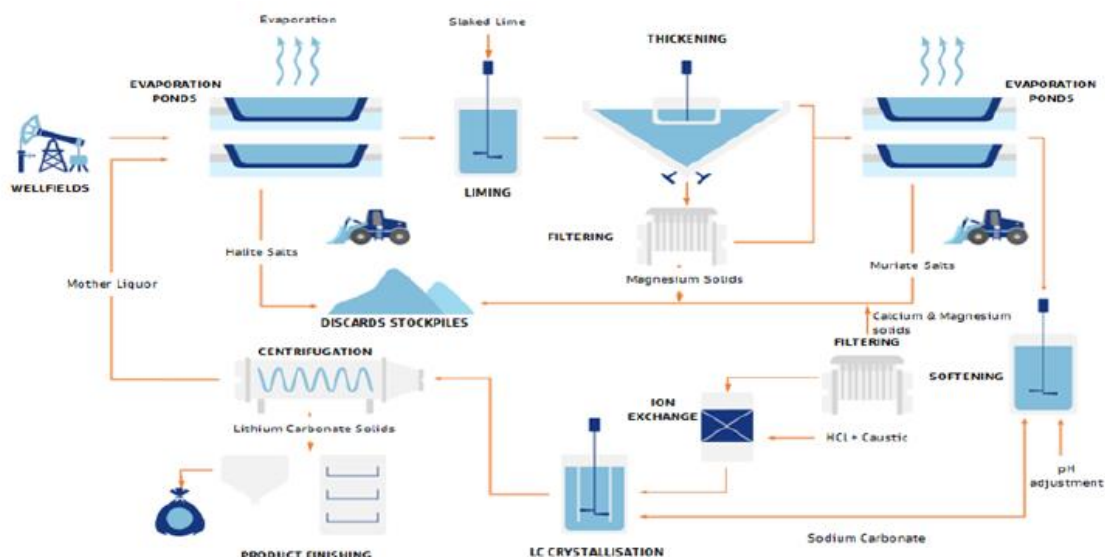


Ilustración 12: Extracción tradicional de litio en salmueras. Fuente [16]

11.2. Métodos de EDL

Las tecnologías de EDL precipitan el litio de la salmuera utilizando filtros, membranas, perlas cerámicas u otros equipos, que a menudo se alojan en un pequeño almacén, reduciendo significativamente la huella medioambiental de los estanques de evaporación utilizados tradicionalmente para producir cantidades comerciales de litio.

En una operación de EDL, la salmuera se bombea a una unidad de procesamiento donde se utiliza un material de absorción, resina o membrana para extraer sólo el litio de la salmuera, mientras que la salmuera gastada puede reinyectarse en los acuíferos de la cuenca. (Ilustración 13)

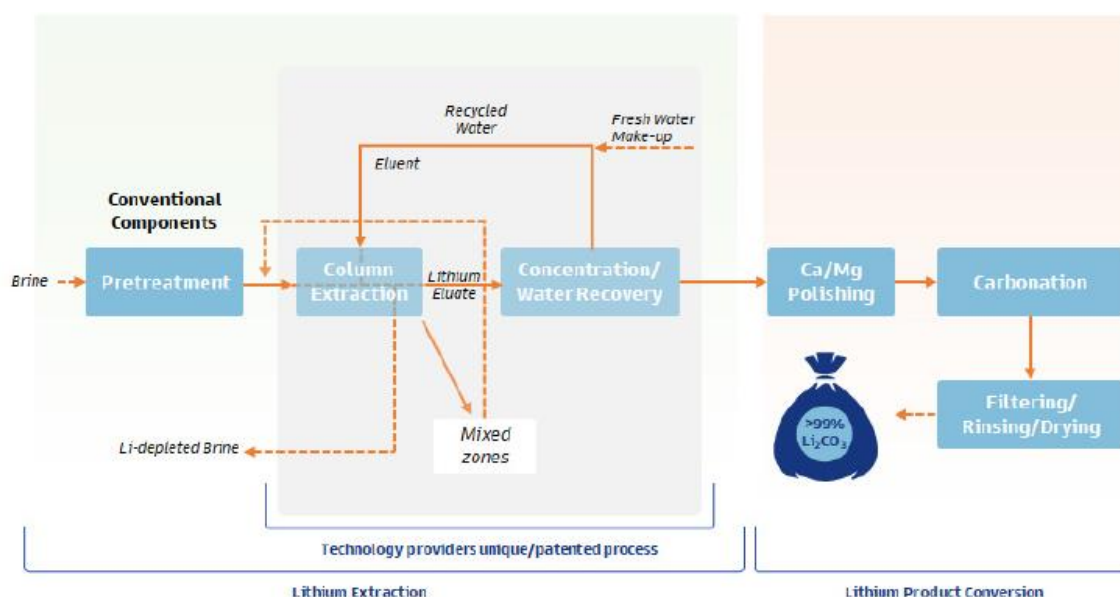


Ilustración 13: Ciclo EDL. Fuente [16]

El plazo de producción más rápido y la posible reinyección de la salmuera en el acuífero es un diferenciador medioambiental clave entre el proceso de extracción directa y el proceso tradicional del litio que utiliza balsas de evaporación.

A continuación, se analiza los métodos de EDL más desarrollados actualmente: adsorción, intercambio iónico y extracción con solventes.[16]

11.2.1. Adsorción

Las resinas de adsorción suelen ser perlas sintéticas de forma redondeada diseñadas para capturar moléculas deseadas/eliminar moléculas no deseadas en soluciones acuosas para permitir la purificación, extracción, separación, concentración y decoloración. Este material ya se está utilizando en una amplia gama de industrias, como la gestión del agua, la farmacéutica, la alimentaria y la hidrometalurgia.

Por tanto, el proceso de adsorción consiste en:

1. Las moléculas de cloruro de litio (LiCl) de la salmuera se infiltran dentro de las capas atómicas de un adsorbente.
2. Una vez que el LiCl llena las capas intersticiales del adsorbente, se elimina con una solución de banda, normalmente agua templada-caliente.

3. Una vez cargado el sorbente con el LiCl, se lava con una corriente diluida de cloruro de litio para eliminar los iones no deseados
4. Se lava una segunda vez para descargar el cloruro de litio.

Algunos sorbentes desarrollados pueden recuperar más del 90% del litio presente, y este método no requiere un lavado ácido ni otros productos químicos, lo que aumenta sus credenciales medioambientales.

Ventajas

- No requiere reactivos como el intercambio iónico o la extracción con disolventes
- Menos afectado por la composición de la salmuera o por las condiciones meteorológicas
- Menor generación de residuos
- Eficiencia de extracción de litio potencialmente >90%
- Adecuado para salmueras con bajas concentraciones de litio

Inconvenientes

- Normalmente requiere temperaturas >40°C
- Puede requerir pasos adicionales para purificar el producto y reciclar el agua
- Algunos se ven comprometidos por la menor absorción de litio y el arrastre de más impurezas al producto
- El equipo de adsorción puede ser caro y complicado

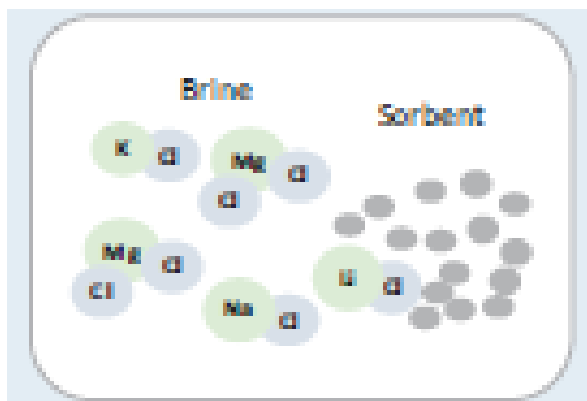


Ilustración 14: Representación gráfica de la adsorción en EDL. Fuente [16]

11.2.2. Intercambio iónico

Los sistemas de intercambio iónico separan los iones indeseables que son sustituidos por otros iones de la misma carga eléctrica. Básicamente, el material de intercambio iónico actúa como un tamiz con una porosidad ajustada que sólo permite el paso de iones de litio (e hidrógeno), donde el tamiz iónico puede lavarse después con una solución ácida que promueve la sustitución de iones de litio por iones de hidrógeno.

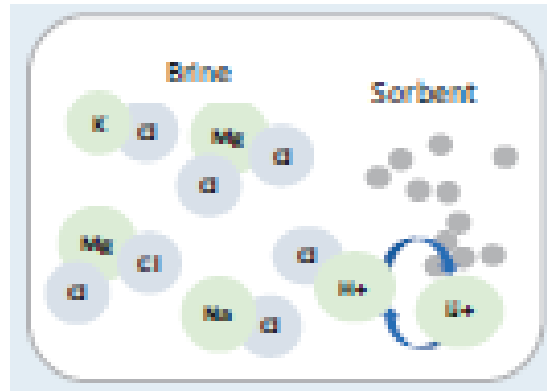


Ilustración 15: Representación gráfica del intercambio iónico en EDL. Fuente [16]

La recuperación de litio por intercambio iónico puede cambiar con un simple ajuste del pH, la temperatura o la composición de la corriente.

Ventajas

- Proceso sencillo
- Alta selectividad para el litio y menor riesgo de contaminación por impurezas
- Adecuado en salmueras con baja concentración de litio.
- Bajo consumo de energía/agua
- Funcionamiento continuo

Inconvenientes

- Costes iniciales elevados
- Necesidad de etapas posteriores

11.2.3. Extracción con disolventes

La extracción con disolventes utiliza una solución orgánica (que contiene disolvente, keroseno, y extractante) para extraer litio de las salmueras, ya sea química o físicamente, y transformarlo en LiCl (o iones).

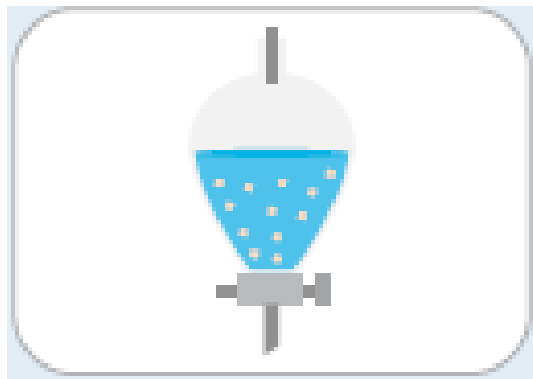


Ilustración 16: Representación gráfica de la extracción con disolventes. Fuente: [16]

La extracción con disolventes puede alcanzar teóricamente cualquier factor de concentración hasta el límite de saturación. El proceso también es versátil y puede adaptarse potencialmente para producir hidróxido de litio de alta pureza, en lugar de carbonato de litio.

Ventajas

- Eficiente
- Coste de operación guapa
- No depende de las condiciones meteorológicas
- Altas tasas de recuperación de litio

Inconvenientes

- Corrosión de equipo
- Impacto medioambiental negativo

11.2.4. Separación con membranas

El último método consiste en utilizar una membrana selectiva de litio para separar los iones Li/Mg, inducidos por fuerzas motrices externas como la presión (nanofiltración), el campo eléctrico (electrodialisis selectiva) o el gradiente térmico.

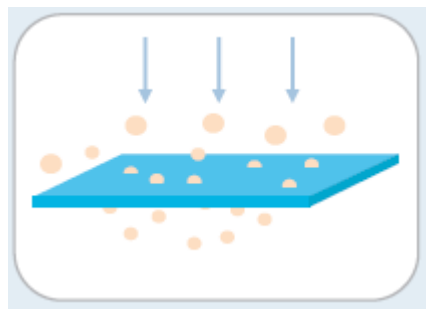


Ilustración 17: Representación gráfica de la separación con membranas en EDL. Fuente [16]

Ventajas

- Alta tasa de recuperación de litio
- Environmental-friendly

Inconvenientes

- Límite a la salmuera con bajo contenido en Na/K
- Proceso intensivo en agua
- Elevados costes iniciales y de explotación

11.2.5. Separación electroquímica

Derivado del método anterior tenemos la separación electroquímica, también llamada electrodialisis. Un proceso por el cual se usa un campo eléctrico para definir el movimiento de iones a través de una membrana semipermeable. Para ello, extrae la salmuera mediante un sistema de bombeo para introducirla en un reactor con dos electrodos. Estos atrapan selectivamente, por un lado, los iones de litio, y por el otro, el cloruro de la salmuera, para ser restituido al salar.

Posteriormente, se invierte la polaridad eléctrica del reactor y se hace el proceso inverso, es decir, se saca la salmuera y se incorpora una solución de recuperación que concentra el cloruro de litio.

Para este proceso se utiliza energía solar y el cloruro de litio extraído de la salmuera forma una especie de batería de litio para almacenar energía renovable intermitente.

12. Reciclaje de baterías de ion de litio

La escasez y el suministro de recursos para la fabricación de baterías de litio es imprescindible estudiarlos para conocer si su abastecimiento y su disponibilidad en el futuro va a ser suficiente. Sin embargo, también es necesario analizar el ciclo y la posible segunda vida que se le puedan dar a las baterías, en concreto, de ion de litio, ya fabricadas. Por ello, en este apartado se centrará en las tecnologías actuales en el reciclaje de estas.

Según la mayoría de los estudios, la mayoría de las baterías de ion de litio desechadas (*Lithium-ion Batteries*, en adelante, LIB) se depositan en vertederos o se almacenan, contaminando la tierra al tiempo que desperdician energía y recursos naturales no renovables. En febrero de 2019, había más de 5,6 millones de vehículos eléctricos (VE) en el mundo, un aumento del 64% desde 2018. Para 2040, se prevé que el 58 % de todos los coches vendidos en el mundo sean VE. Con el crecimiento explosivo del número de VE combinado con el enorme tamaño de sus baterías (la batería del Tesla Model 3 Long Range contiene 4416 celdas y pesa 480 kg), cada año se generan y se generarán importantes residuos de LIB que, si no se reciclan y reutilizan, ejercerán impactos ambientales masivos y acelerarán el agotamiento de las reservas minerales. En números generales la Agencia Internacional de la Energía, estima que los vehículos eléctricos producidos solo en 2019 generaron 500.000 toneladas de residuos de LIB, y la cantidad total de residuos generados para 2040 podría llegar a los 8 millones de toneladas.[17]

12.1. Reciclaje de baterías de litio a escala industrial

Debido a la compleja estructura y al número de materiales de las LIB, deben someterse a diversos procesos antes de su reutilización/reciclado. En primer lugar, las LIB deben clasificarse y, en la mayoría de los casos pretratadas mediante descarga o inactivación, desmontaje y separación, tras lo cual pueden someterse a reciclado directo, la pirometalurgia, la hidrometalurgia o una combinación de estos métodos, como se muestra en la *Ilustración 18*. [18]

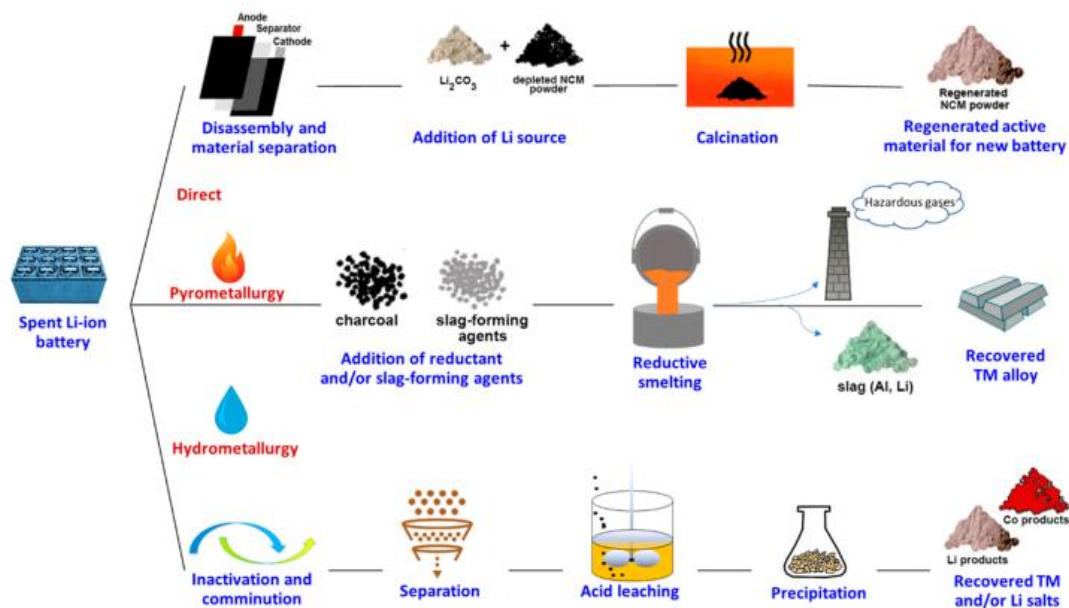


Ilustración 18: Métodos de reciclaje de LIB. Fuente [19]

Los métodos directos, en los que se extrae el material del cátodo para su reutilización o reacondicionamiento, requieren el desmontaje de la LIB para obtener los materiales útiles.

La pirometalurgia utiliza el calor para convertir los óxidos metálicos utilizados en los materiales de las pilas en metales o compuestos metálicos. En la fundición (*Reductive smelting*), los materiales de la pila se calientan al vacío o en una atmósfera inerte para convertir los óxidos metálicos en una aleación metálica mixta que contiene: cobalto, níquel, cobre, hierro, aluminio y litio, entre otros. Los métodos pirometalúrgicos requieren métodos de pretratamiento más sencillos (por ejemplo, trituración) para preparar las baterías.[20]

Los métodos hidrometalúrgicos, utilizan principalmente soluciones acuosas para extraer y separar los metales de las LIB. Una vez que los metales se han extraído en solución mediante lixiviación, se precipitan selectivamente como sales mediante la variación del pH o se extraen con disolventes orgánicos.

Con ello, hoy en día, a nivel escala industrial, esto es un volumen de tratamiento superior a >1000 T/año, se utilizan combinaciones de métodos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos como se puede observar en la siguiente tabla con el listado de las compañías principales y clasificadas por su ubicación, volumen y método utilizado (*Tabla 2*).

label	company	location	volume (tons/year)	method	status
1	ABT	Fernley, NV, US	20,000	Unknown	Planned
2	Retriev (Toxco)	Trail, BC, CA	4,500	Hydro	Established
3	Li-Cycle	Gilbert, AZ, US	10,000	Hydro	Planned
4	Ganfeng Li	Sonora, MX	Unknown	Unknown	Planned
5	Li-Cycle	Tuscaloosa, AL, US	10,000	Hydro	Planned
6	Inmetco	Elwood, PA, US	6,000	Pyro	Established
7	Li-Cycle	Rochester, NY, US	5,000	Hydro	Established
8	Li-Cycle	Kingston, ON, CA	5,000	Hydro	Established
9	Fenix	Whitehall, UK	10,000	Hydro	Planned
10	Valdi	Commentry, FR	20,000	Pyro	Established
11	Umicore Valeas	Hoboken, BE	7,000	Pyro/hydro combo	Established
12	Recupyl	Grenoble, FR	110	Hydro	Established
13	Accurec	Krefeld, DE	4,000	Pyro/hydro combo	Established
14	Glencore	Baar, CH	3,000	Pyro/hydro combo	Established
15	Redux	Offenbach, DE	50,000	Pyro	Established
16	Northvolt	Frederikstad, NO	8,000	Unknown	Planned
17	Fortum	Harjavalta, FI	Unknown	Unknown	Planned
18	Akkuser	Nivala, FI	4,000	Pyro/hydro combo	Established
19	Green Li-ion	Singapore	Unknown	Unknown	Planned
20	Brup Recycling Technologies	Hunan, CN	100,000	Pyro/hydro combo	Established
21	Taisen	Hunan, CN	6,000	Hydro	Established
22	GEM	Jingmen, CN	30,000	Hydro	Established
23	Guanghua Sci-Tech	Guangdong, CN	12,000	Preprocessing	Established
24	Gotion High-Tech	Hefei, CN	Unknown	Unknown	Planned
25	Quzhou Huayou	Quzhou, CN	40,000	Pyro	Established
26	Tesla	Shanghai, CN	Unknown	Unknown	Planned
27	SungEel HiTech	Gunsan, KR	8,000	Hydro	Established
28	Posco Hy Clean Metal	Gwangyan, KR	12,000	Unknown	Planned
29	JX Nippon Mining	Tsuruga, JP	5,000	Pyro/hydro combo	Established
30	Dowa Eco-System	JP	6,500	Pyro	Established
31	Sumitomo/Sony	Namie, JP	150	Pyro	Established
32	Envirostream	Melbourne, AU	3,000	Preprocessing	Established

Tabla 2: Compañías dedicadas al reciclaje de LIB a nivel industrial. Fuente [19]

Por otro lado, este método combinado incluye un pretratamiento mecánico, térmico y uno hidrometalúrgico. El propósito del pretratamiento térmico es eliminar los compuestos orgánicos, ya que pueden causar problemas en etapas posteriores. Se cree que la presencia de grafito conduce a una menor extracción de litio debido a la adsorción del

mismo. A continuación, se muestra un diagrama de flujo del proceso combinado (Ilustración 19):

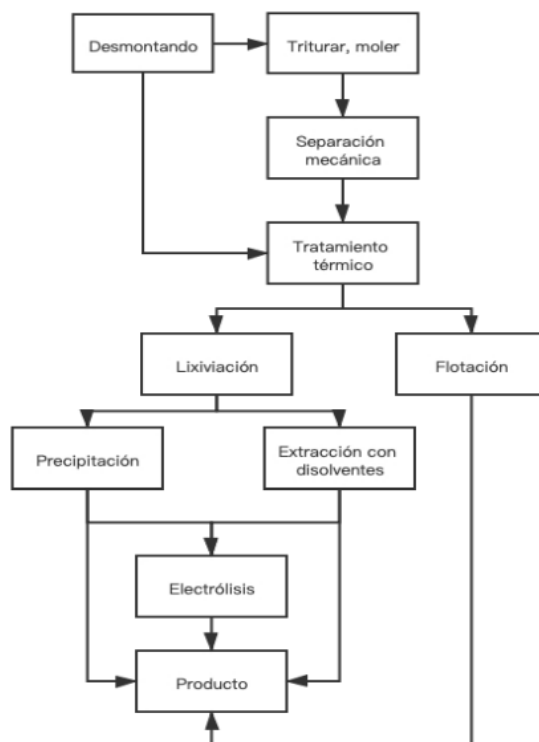


Ilustración 19: Diagrama de flujo del tratamiento combinado en el reciclaje de LIB [21]

Esta combinación de métodos permite flexibilidad de las materias primas de las baterías. En cambio, los métodos en desarrollo se basan en la hidrometalurgia en mayor medida, debido al menor coste de las instalaciones que supone.

12.2. Técnicas de reciclado a escala laboratorio

Aunque los métodos anteriormente descritos sean los utilizados por excelencia en la industria de reciclaje de baterías, se puede concluir en últimos estudios, que los presentes y próximos procesos de reciclado se deberían enfocar más hacia la recuperación de litio contenido en los electrolitos. Por otro lado, ha crecido también el interés en la recuperación del grafito.[19]

Así es que, con estas tendencias, surjan nuevas tecnologías a escala laboratorio (<1000 t/año) como:

- Flotación por espuma

Separación selectiva de materiales hidrofóbicos (grafito) y materiales hidrofílicos (óxidos) presente en el material activo

- Extracción con fluidos supercríticos

Recuperación del electrolito y reutilización de este. Favorece la extracción del resto de materiales activos.

- Calcinación con sulfatos

- Técnicas electroquímicas
 - Extracción electroquímica
 - Bombeo electroquímico

TERCERA PARTE: BIOLIXIVIACIÓN

13. Recuperación de Li mediante lixiviación

Retomando lo mencionado en el apartado anterior, la mayor parte de las compañías dedicadas al reciclaje de LIB usan un proceso combinado de tratamientos térmicos, mecánicos e hidrometalúrgicos. Sin embargo, las tecnologías en desarrollo se están centrando en la hidrometalurgia por su menor coste en las instalaciones y, concretamente, en la etapa de la lixiviación.

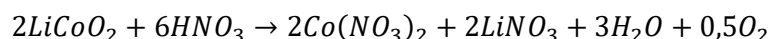
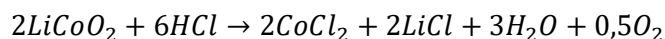
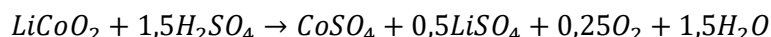
La lixiviación, por definición, es el proceso de extraer una sustancia de un material sólido, después de haber estado en contacto con un líquido. La sustancia que se extrae el sólido, en nuestro caso, el óxido de litio y cobalto (LiCoO_2), lo hace al llegar a la solución, una en la que es soluble, para su posterior precipitación o extracción.

Con ello, hay varios lixiviantes, que varían en términos de pH, potencial redox y que pueden ayudar a aumentar la velocidad, o la selectividad de la disolución del metal deseado.

Es en este punto, se dedicarán los siguientes apartados a describir y profundizar sobre tres tipos de lixiviantes: ácidos inorgánicos, ácidos orgánicos y bacterias.

13.1. Lixiviación con ácidos inorgánicos

Los ácidos inorgánicos más utilizados son el clorhídrico (HCl), el sulfúrico (H_2SO_4) y el nítrico (HNO_3), que como ya se ha dicho antes, reaccionan con el activo de interés, el óxido de cobalto y litio (LiCoO_2), resultando en las siguientes reacciones:[21]



La solución de HCl se convirtió en el lixiviante inorgánico más eficaz debido a la capacidad de los iones cloruro de desestabilizar la formación de una capa superficial. La eficacia aumenta con la relación sólido-líquido (Tabla 3):

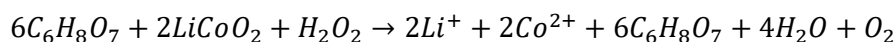
Lixivante	Condiciones	Sólido-Líquido (g/L)	Lixiviación Li (%)	Fuente
4M HCL	70°C / 120min	33/1	99,7%	[22]
4M HCL	80°C / 60min	100/1	99%	[23]
5M HCL	80°C / 60min	100/1,5	/	[24]

Tabla 3: Comparativa de condiciones de lixiviación de Li con HCL. Fuente [22], [23], [24]

Para aumentar la eficiencia del proceso, hay autores que lo han conseguido añadiendo un agente reductor.

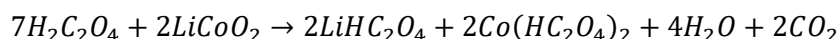
13.2. Lixiviación con ácidos orgánicos

El ácido orgánico con mayor eficacia que con resultados experimentales es el ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$):[25]



Cuyos rendimientos de extracción caen cuando la densidad de la pulpa se incrementa.

Por otro lado, existe el ácido oxálico, con el que se puede separar directamente el litio del cobalto sin necesidad de una extracción posterior.



13.3. Lixiviación bacteriana o biolixiviación

La biolixiviación ha demostrado ser una de las tecnologías más prometedoras del sector hidrometalúrgico. Sin embargo, la biolixiviación de metales provenientes de residuos electrónicos todavía está en una etapa inmadura. Específicamente en el reciclaje de LIB se han hecho investigaciones a escala de laboratorio, consiguiendo recuperaciones significativas de litio, algunas incluso en un rango del 80-95%. Por lo cual resulta necesario seguir trabajando en pro del reciclaje de este tipo de baterías que son y serán una fuente secundaria abundante.

La ventaja fundamental de biolixiviación de las LIB sobre los procesos de reciclaje convencionales es que genera desechos de ácidos suaves y emite niveles bajos de gases nocivos, lo que elimina la necesidad de un tratamiento adicional y reduce así los costes de tratamiento.

Aunque también se usen algunos hongos, se emplean mayormente bacterias quimiolitotróficas, acidófilas, utilizándose como fuente de energía azufre elemental y/o iones ferrosos según el caso, lo cual se metaboliza en un medio lixiviante de ácido sulfúrico y/o iones férricos.

13.3.1. Mecanismos de biolixiviación

De forma general existen dos mecanismos de biolixiviación: directa e indirecta, en función de la existencia o no de contacto físico entre los microorganismos y las partículas metálicas sólidas. El mecanismo directo se da por la acción bacteriana dónde las reacciones químicas son catalizadas enzimáticamente e implica el contacto físico de los microorganismos con el mineral. En el mecanismo indirecto se dan reacciones químicas, sean o no sean enzimáticas, sin que haya contacto físico entre los microorganismos y el mineral, esto sin que se desconozca el papel de este mecanismo en la formación de reactivos químicos que participan en el proceso. Así entonces, el microorganismo primero produce metabolitos primarios y secundarios, que luego van a propiciar el proceso de lixiviación. Luego, el material o mineral a lixiviar entra en contacto con el medio generado por los microorganismos. [26]

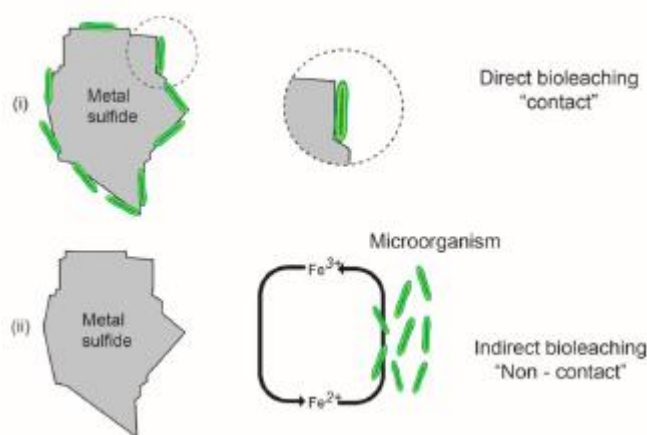
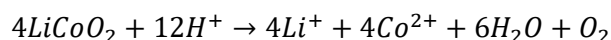


Ilustración 20: Mecanismos de biolixiviación. Fuente [26]

Existen diferentes opiniones sobre cuál de estos dos métodos es superior al otro y tiene una mayor eficacia. Aunque en el mecanismo indirecto no es necesario que las células se adhieran a la superficie sólida de los metales, la eficiencia del proceso puede mejorarse aumentando localmente la concentración de los agentes de lixiviación (H_2SO_4) en la superficie sólida como resultado de la formación de biopelículas microbianas. Por lo tanto, dado que la superficie sólida está físicamente en contacto con los microorganismos en la biolixiviación directa, puede ser más eficiente que la indirecta.

Sin embargo, según los estudios industriales, el método indirecto parece ser más apropiado porque tiene mayor flexibilidad para optimizar el proceso en comparación con el método directo. De hecho, en el método directo, los microorganismos pueden verse afectados por la disolución de metales tóxicos y las condiciones del proceso, como la temperatura, el pH y la concentración de oxígeno soluble, que deben mantenerse y controlarse durante el proceso.[27]

Un ejemplo de extracción de litio de las LIB, mostrando el proceso de biolixiviación a través de bacterias ironoxidantes y sulfurooxidantes en las LIBs para extraer Co y Li mediante la siguiente reacción:



13.3.2. Métodos de biolixiviación

En cuanto a su aplicación, la biolixiviación se puede realizar desde tres tipos de enfoques[26]. En los procesos (one-step) se recurre al mecanismo directo en el que el mineral interactúa con el medio, el sustrato energético y el mineral a lixiviar. En dos pasos (two-steps) se recurre al mecanismo indirecto, en el que los microorganismos generan el medio lixivante, y posteriormente se agrega el mineral para ser lixiviado. Existe además una forma intermedia de hacerlo, en la que justo en la fase logarítmica de crecimiento de las bacterias se agrega el material a lixiviar. (Ilustración 21)

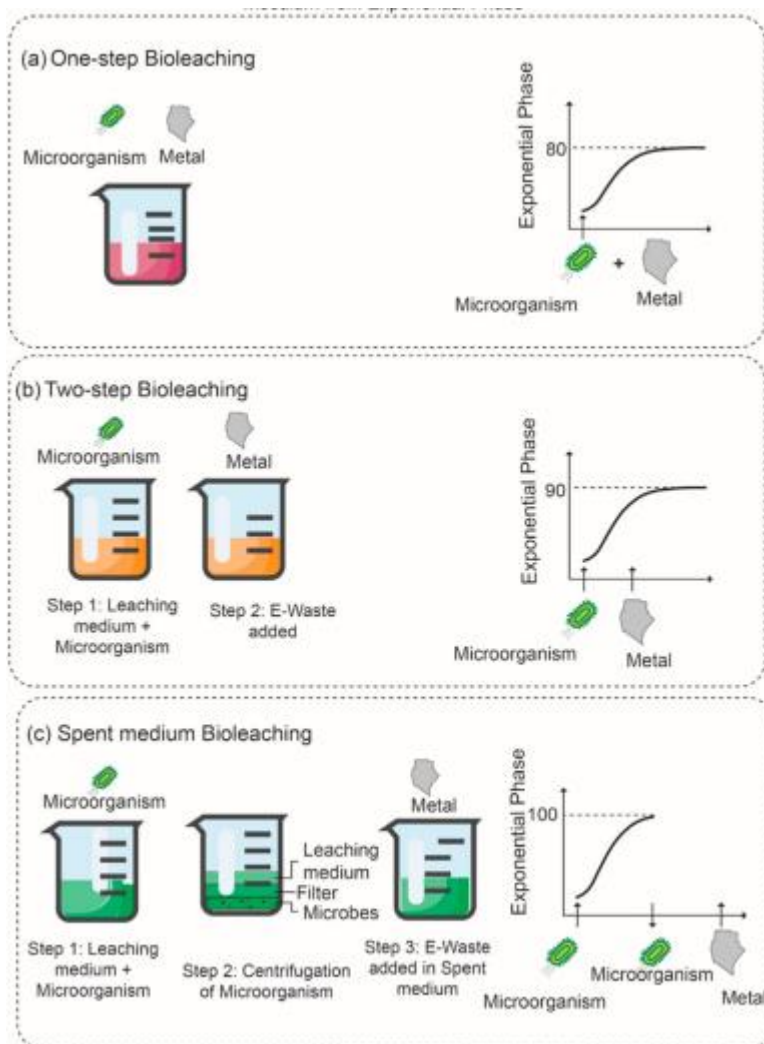


Ilustración 21: Enfoques en la biolixiviación con microorganismos. Fuente [26]

Existen diversos estudios comparando la eficiencia de cada uno de los métodos en el reciclaje de baterías de ion de litio.

En el primero se estudia la recuperación de Li y Co a partir de residuos de LIB realizada mediante el uso de cepas de *Aspergillus niger* y *Acidithiobacillus thiooxidans* a través de procesos de one-step y spent medium. El crecimiento de los microorganismos y la producción de ácidos orgánicos en condiciones de no existencia de residuos de LIBs, y el posterior inicio de la biolixiviación por el medio gastado libre de células aportó más ventajas entre los enfoques utilizados. La comparación de la extracción de metales en medio agotado mediante lixiviación fúngica y bacteriana mostró que las cepas de

Aspergillus niger recuperaban el 100% del Li y el 82% del Co, mientras que con *Acidithiobacillus thiooxidans* sólo se extraía el 66% del Li y el 23% del Co.

En otro, se aplicó el proceso para recuperar Li, Ni, Co, Cu, Mn y Al de las LIB. Mediante las condiciones de cultivo fúngico deseadas, los ácidos biogenerados fueron producidos por *Aspergillus niger*. Estos ácidos se aplicaron a la biolixiviación de metales a distintas densidades de pulpa, obteniéndose el 77% de Li con 2% (w/v).

Con ello, se puede observar que la aplicación de biolixiviación además de ser un proceso medioambientalmente positivo resulta posible obtener unas altas tasas del metal extraído.

13.3.3. Factores en la biolixiviación

Hay que señalar que la eficiencia del proceso de lixiviación bacteriana depende principalmente de la capacidad de los microorganismos y la composición de las LIB, y que el rendimiento de la extracción de metales se puede maximizar optimizando las condiciones de crecimiento de las bacterias y hongos y aumentando la producción de los metabolitos necesarios para la biolixiviación [28]. Para ello hay que atender a factores como:

Nutrientes microbianos

Las bacterias quimiolitotróficas como *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Af), hasta la fecha, las bacterias más comúnmente utilizadas en los ensayos requieren sales ferrosas como nutrientes principales para producir ácido sulfúrico y iones ferrosos, aunque también puede crecer con azufre, pero de forma más lenta.

Los medios de crecimiento también se complementan con sales de amonio, fosfato y magnesio para su crecimiento óptimo. Estas bacterias requieren ninguna fuente de carbono porque utilizan CO₂ de la atmósfera. Sin embargo, los hongos requieren sacarosa o glucosa como fuente de carbono, y pueden sustituirse como desechos del procesamiento de alimento.

Suministro de O₂ y CO₂

Para el crecimiento adecuado y la alta actividad del microorganismo durante el proceso de biolixiviación es necesario un suministro suficiente de oxígeno, y esto se puede lograr mediante aireación o agitación. También se requiere suministro de CO₂ cuando la biolixiviación se realiza en condiciones anaeróbicas con microorganismos específicos, como los hongos anteriormente mencionados.

pH

Para solubilizar los metales de las LIB es necesario mantener el valor del pH correcto en el medio, esto de acuerdo con las condiciones óptimas de crecimiento microbiano y lixiviación. El pH óptimo para las bacterias acidófilas está en el rango de 2,0 a 2,5, además la oxidación de la sal ferrosa y el elemento azufre es alta en este rango. A un pH inferior a 2,0, Af puede adaptarse al medio ambiente cuando aumenta la producción de ácido.

Potencial redox microbiológico

El potencial redox es un factor crucial y esencial en la biolixiviación mediado por sulfato férrico. El par redox $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ determina principalmente el potencial de oxidación/reducción (ORP). Mediante la adición de reductores químicos o la limitación del suministro de oxígeno, se puede controlar el potencial redox.

Aun así, no se ha informado ninguna publicación sobre el rango óptimo de ORP para aumentar la eficiencia de lixiviación de metales en la biolixiviación de las LIB.

Temperatura

La eficiencia de lixiviación se puede incrementar realizando el proceso a la temperatura óptima del microorganismo (la temperatura óptima para Af está entre 28 y 30 °C).

Tolerancia al metal y densidad de pulpa

Las diferentes cepas exhiben varios niveles de sensibilidad a la tolerancia a los metales. Microorganismos como las bacterias Af tienen una alta tolerancia a metales como el níquel, el cobre y el zinc.

La toxicidad del metal es alta a altas densidades de pulpa, lo que reduce la disolución del metal debido a una menor actividad microbiana. La lixiviación bacteriana de las LIB a altas densidades de pulpa aumenta la viscosidad del medio de lixiviación y cuando esta es alta, la penetración de oxígeno en la profundidad del medio de lixiviación es menor, cambiando el metabolismo del microorganismo, lo que reduce la eficiencia de lixiviación de metales.

13.4. Biominería, una nueva aplicación de la biolixiviación

Después de analizar y entender el funcionamiento de la biolixiviación, como proceso de extracción de metales en medios acuosos mediante el uso de microorganismos, es fácil pensar en otros campos de aplicación de este método. Uno de estos campos es la biominería.

La biominería de litio, por tanto, nace como una técnica que utiliza microorganismos para extraer litio de minerales y salmueras de una manera más ecológica y eficiente que los métodos tradicionales.

A continuación, adjuntamos una tabla resumen con el objetivo de comparar las diferentes tecnologías de obtención de litio que hemos tratado hasta ahora en este proyecto, utilizando parámetros económicos como el coste, tasa de extracción y tiempo, además de parámetros generales como el tiempo invertido, el índice de madurez tecnológica y las emisiones. (*Tabla 4*)

ORIGEN	TECNOLOGÍA		MADUREZ	TASA DE EXTRACCIÓN	PROCESOS COMPLEMENTARIOS	EMISIONES	COSTE INICIAL		COSTE DE OPERACIÓN	TIEMPO
MINERÍA	TRADICIONAL		ALTA	60-80%	SÍ	ALTO	Varía según proceso		Semanas a meses	
	BIOMINERÍA		MUY BAJA		SÍ	BAJO	Varía según proceso			
SALMUERAS	EVAPORACIÓN		ALTA	40-60%	NO	MEDIO-ALTO	~25000\$/ T LCE	~4000\$/ T LCE	MESES A AÑOS	
	EDL	Adsorción	MEDIO	>90%	SÍ	BAJO	~30000\$/ T LCE	~3500\$/ T LCE	HORAS A DÍAS	
		Intercambio iónico	ALTA	>80%	SÍ	BAJO				
		Extracción con disolventes	ALTA	>90%	NO	ALTO (Corrosión de equipo)				
		Separación con membranas	ALTA	>90%	NO	MUY BAJO				
		Separación electroquímica	MEDIA	>90%	SÍ	MUY BAJO				
	RECICLAJE DE BATERÍAS	DIRECTO		ALTA		NO	BAJO	ALTO		DÍAS
PIROMETALURGIA		ALTA	ALTA	SÍ	ALTO	Alto consumo de energía		SEMANAS		
HIDROMETALURGIA		Varía según el proceso de lixiviación	ALTA	SÍ	MEDIO	ALTO		Varía según el proceso de lixiviación		

Tabla 4: Comparativa de las tecnologías tratadas en la obtención de litio. Fuente: Elaboración propia

Aunque la biominería de litio es prometedora, aún se encuentra en etapas de investigación y desarrollo. Algunos de los desafíos incluyen la identificación de microorganismos específicos que sean altamente eficaces en la lixiviación de litio, la optimización de las condiciones de operación y la escalabilidad de estos procesos para su uso industrial.

Con ello se pueden destacar a día de hoy proyectos en Sudamérica, principal territorio de yacimientos de litio, dónde se está fomentando la biominería de litio:

***BioMetallum* (Argentina) [29]**

Lithium BioX, desarrollado por *BioMetallum*, es un método innovador y sostenible que utiliza biotecnología para la extracción eficiente de metales de las salmueras. Esta técnica mejora significativamente la recuperación de metales y acelera el proceso de extracción, apoyando la transición hacia la energía renovable. Es ambientalmente amable, requiriendo solo el 5% del espacio de los métodos tradicionales y opera consistentemente independientemente del clima.

Este método también apoya la conservación del agua al devolver la salmuera después de extraer el litio, haciéndolo económicamente viable para proyectos de litio de baja concentración en áreas como Bolivia y Argentina. Lithium BioX cuenta con una alta tasa de recuperación de litio de más del 90% y permite la extracción de otros metales de la salmuera, optimizando el uso de recursos.

Crucialmente, previene la producción de residuos tóxicos, reduciendo los costos de disposición y alineándose con una visión para un futuro más limpio.

Conclusiones

Debido al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la contaminación ambiental que generan, el mundo actual se encuentra envuelta en la denominada transición energética: las baterías recargables, especialmente las de litio, se han convertido en un foco clave para la investigación y el desarrollo futuros como sistemas de almacenamiento de energía. El aumento significativo en la producción de vehículos eléctricos ha provocado, provoca y provocará la necesidad urgente de aumentar la capacidad de obtención de este mineral crítico y objeto principal de este proyecto: el litio.

Se han desarrollado diversos procesos para extraer metales valiosos de las baterías de litio usadas, algunos de los cuales ya han sido industrializados. Un proceso de reciclaje ideal debería recuperar todos los componentes de las baterías de litio usadas con un bajo consumo energético y sin generar contaminación ambiental. Hasta ahora, algunas tecnologías han logrado cumplir con estos requisitos; sin embargo, debido a la diversidad de las baterías de litio, casi todas requieren pasos de procesamiento complejos y reactivos costosos. Por lo tanto, se necesita un mayor esfuerzo en la investigación y desarrollo de tecnologías de reciclaje más eficientes.

El reciclaje de baterías de litio puede recuperar de manera efectiva el costo de estas baterías, lo que representa una ventaja económica considerable. El núcleo de las baterías de iones de litio para vehículos representa el 36% de su costo total; si se considera el beneficio bruto, este porcentaje puede aumentar hasta un 49%. En las baterías de consumo, el costo del núcleo es incluso mayor. El coste de los materiales catódicos ricos en níquel, cobalto, manganeso y otros metales supone un 45% del total. A través del reciclaje de las materias primas, los metales como el níquel, el cobalto y el manganeso pueden alcanzar tasas de recuperación superiores al 95%, mientras que la tasa de recuperación del litio también supera el 70%, lo que genera importantes beneficios económicos.

Sin embargo, estos procesos industriales generan todavía demasiadas emisiones y por ello, ha surgido la necesidad de estudiar y analizar nuevas vías de reciclaje y de recuperación de litio menos dañinas para el medio ambiente. De aquí surge la biolixiviación, proceso puede intervenir en el reciclaje de las baterías una vez estas llegan al final de su vida, como en la captación del elemento en sus yacimientos naturales, introduciendo el concepto de biominería.

En resumen, el desarrollo sostenible de la industria del reciclaje representa un desafío y requiere una participación activa y una estrecha colaboración entre los organismos gubernamentales, los fabricantes, los recicladores y los usuarios. Cada grupo tiene una responsabilidad diferente: el gobierno, en particular, debe desarrollar, implementar y facilitar la aplicación de políticas, mientras que los fabricantes y recicladores son responsables de aplicar el enfoque "fabricar-vender-reciclar-reproducir" que promueve el reciclaje ecológico de las baterías de litio.

ANEXOS

Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas

Los objetivos de Desarrollo Sostenible son una llamada de Naciones Unidas a todos los países con el objetivo de combatir los grandes desafíos a los que la humanidad se expone y garantizar que las generaciones futuras satisfagan sus necesidades.[30]

Es necesario mencionar que el fin principal de este proyecto es fomentar la transición energética informando de alternativas formas de obtener litio para satisfacer la creciente demanda en los próximos años, mientras que se contribuye al cumplimiento de los siguientes objetivos (*Ilustración 22*):

- Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. En este proyecto se impulsarán tecnologías para aumentar el uso eficiente de recursos hídricos en el sector energético y asegurar la sostenibilidad.
- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. Desde este trabajo se busca aumentar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas.
- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructuras. Como desde este proyecto se promueven nuevas formas para la obtención de litio, también se busca apoyar el desarrollo de estas tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países de desarrollo.
- Objetivo 13: Acción por el clima. Se busca promover mecanismos para aumentar la capacidad para la planificación y gestión eficaces en relación con el cambio climático.



Ilustración 22: ODS tratados en el Proyecto. Fuente: Naciones Unidas[30]

Bibliografía

- [1] IEA, “The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions,” 2022, Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [2] V. Quintero, “Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones,” *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1. Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2907/3616>
- [3] D. Qiao, G. Wang, T. Gao, B. Wen, and T. Dai, “Potential impact of the end-of-life batteries recycling of electric vehicles on lithium demand in China: 2010-2050,” *Sci Total Environ*, vol. 764, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.142835.
- [4] J. Song *et al.*, “Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China,” *JCPro*, vol. 215, pp. 570–581, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.081.
- [5] “Tipos de baterías de iones de litio,” *FHsolar&ledIberica*. Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://fhsolarled.com/tipos-de-baterias-de-iones-de-litio/>
- [6] Gobierno Mexico, “Perfil de Mercado de Litio,” *Secretaría de Economía*, 2018.
- [7] R. Fernández, “Litio: principales países productores 2023.” Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/600308/paises-lideres-en-la-produccion-de-litio-a-nivel-mundial/>
- [8] R. Fernández, “Litio, tierras raras y otros minerales estratégicos.” Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: <https://es.statista.com/temas/9520/minerales-estrategicos-o-criticos-en-el-mundo/#topicOverview>
- [9] “Talisson Lithium.” Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.talisonlithium.com/>
- [10] “Litio y derivados archivos - SQM | SQM.” Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.sqm.com/productos/litio-y-derivados/>
- [11] “Sigma Lithium Resources.” Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://sigmalithiumresources.com/>
- [12] “Welcome - AMG Brazil.” Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://amg-br.com/>
- [13] “E3 Lithium - Operations.” Accessed: Aug. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.e3lithium.ca/our-assets/operations/>
- [14] IEA, “Critical Minerals Data Explorer.” Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>
- [15] R. Fernández, “Litio: producción mundial 2010-2023.” Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/1313992/produccion-de-litio-refinado-en-el-mundo/>

- [16] H. Nicolaci *et al.*, “Direct Lithium Extraction: A potential game changing technology,” 2023. [Online]. Available: www.gs.com/research/hedge.html.
- [17] M. Stone, “As electric vehicles take off, we’ll need to recycle their batteries,” National Geographic. Accessed: Aug. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/electric-vehicles-take-off-recycling-ev-batteries>
- [18] E. Fan *et al.*, “Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects,” *Chem Rev*, vol. 120, no. 14, pp. 7020–7063, Jul. 2020, doi: 10.1021/ACS.CHEMREV.9B00535/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CR9B00535_0022.GIF.
- [19] Z. J. Baum, R. E. Bird, X. Yu, and J. Ma, “Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends,” *ACS Energy Lett*, vol. 7, no. 2, pp. 712–719, Feb. 2022, doi: 10.1021/acsenergylett.1c02602.
- [20] H. Li *et al.*, “Enhancing Lithium Recycling Efficiency in Pyrometallurgical Processing through Thermodynamic-Based Optimization and Design of Spent Lithium-Ion Battery Slag Compositions,” *ACS Sustainable Resource Management*, vol. 1, no. 6, pp. 1170–1184, Jun. 2024, doi: 10.1021/ACSSUSRESMGT.4C00064.
- [21] D. Yang, “Reciclaje de baterías de litio para vehículos eléctricos,” 2021.
- [22] A. Chagnes and J. Światowska, “Lithium process chemistry : resources, extraction, batteries, and recycling,” *Published in 2015*, 2015, Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: <https://lib.ugent.be/catalog/ebk01:3710000000431003>
- [23] L. Yu, B. Shu, and S. Yao, “Recycling of Cobalt by Liquid Leaching from Waste 18650-Type Lithium-Ion Batteries,” *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 05, no. 04, pp. 425–429, 2015, doi: 10.4236/ACES.2015.54043.
- [24] C. M. Costa, J. C. Barbosa, R. Gonçalves, H. Castro, F. J. Del Campo, and S. Lanceros-Mendez, “Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: advances, challenges and opportunities”.
- [25] S. Sakultung, K. Pruksathorn, and M. Hunsom, “Simultaneous recovery of valuable metals from spent mobile phone battery by an acid leaching process,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 272–277, Mar. 2007, doi: 10.1007/S11814-007-5040-1.
- [26] P. Moazzam *et al.*, “Lithium bioleaching: An emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries,” Aug. 01, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130196.
- [27] J. J. Roy, B. Cao, and S. Madhavi, “A review on the recycling of spent lithium-ion batteries (LIBs) by the bioleaching approach,” *Chemosphere*, vol. 282, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130944.
- [28] S. Salazar, “Lixiviación de metales de las baterías recargables de ion litio,” 2022.
- [29] “Biometallum | Extracción Directa Biológica De Metales.” Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: <https://bio-metallum.com/ES/>

- [30] Naciones Unidas, “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible.” Accessed: Aug. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>