COLECCIÓN
CIENCIAS Y HUMANIDADES PARA MÉXICO

Impulso soberano de la cadena de valor de litio

Tecnologías de almacenamiento de energía y semiconductores

Alejandra Straffon
COORDINADORA



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

COLECCIÓN
CIENCIAS Y HUMANIDADES PARA MÉXICO

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) difunde, a través de la colección Ciencias y Humanidades para México, obras de investigación científica y humanística que aportan conocimientos para el desarrollo y bienestar de nuestro país.

Las personas autoras, tanto nacionales como extranjeras, son profesionales y académicas altamente capacitadas en la investigación humanística y científica, dedicadas a la atención de las principales temáticas y los problemas prioritarios de México, así como del contexto latinoamericano.

Con la publicación de estos trabajos se conforma un corpus valioso, accesible para estudiantes de educación superior, así como profesionales especializados y no especializados. De igual forma, el público general podrá completar o enriquecer su formación mediante la lectura y el estudio de sus páginas.

Los libros de esta colección abordan cuestiones fundamentales y de interés, como salud, movilidad, soberanía alimentaria, migración, cambio climático, transición energética, educación, artes y literatura, y contribuyen al diálogo e intercambio de ideas sobre temas actuales que remiten a nuestras realidades.

De esta manera, el Conahcyt y el Fondo de Cultura Económica han unido esfuerzos para hacer de esta colección una muestra significativa de las visiones y los conocimientos que las y los expertos tienen respecto de algunos temas sobresalientes que hoy se debaten en México y América Latina.

Impulso soberano de la cadena de valor de litio

Tecnologías de almacenamiento de energía y semiconductores

Programa Nacional Estratégico de Energía
y Cambio Climático (Pronace ECC)

COLECCIÓN
CIENCIAS Y
HUMANIDADES
PARA MÉXICO

Impulso soberano de la cadena de valor de litio

Tecnologías de almacenamiento de energía y semiconductores

CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Instituto Mora

Primera edición, 2024

Straffon, Alejandra (coord.)
Impulso soberano de la cadena de valor de litio. Tecnologías de almacenamiento de energía y semiconductores. Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace ECC) / coord. de Alejandra Straffon ; present. de María Elena Álvarez-Buylla Roces ; mensaje de Pablo Daniel Taddei Arriola. – México : Conahcyt, Instituto Mora, 2024
412 p. : ilus., fots., maps., figuras, tablas ; 23 x 17 cm – (Colec. Ciencias y Humanidades para México)

ISBN formato impreso: 978-607-8273-74-4
ISBN formato digital: en trámite

1. Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace ECC) 2. Litio 3. Sistemas de energía eléctrica – México 4. Producción de energía eléctrica – México 5. Industria eléctrica – México - Política gubernamental 6. Recursos energéticos renovables – México 7. Política energética – México 8. Plan Sonora de Energías Sostenibles I. Álvarez-Buylla Roces, María Elena, present. II. Taddei Arriola, Pablo Daniel, mensaje III. t. IV. Ser.

LC TK1001 Dewey 333.794 S866i

CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Distribución Nacional

© Coordinadora: Alejandra Straffon
© Ilustración: Nancy Garduño

D.R. © 2024 Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
Av. Insurgentes Sur 1582, col. Crédito Constructor,
Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03940

D. R. © 2024 Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora
Calle Plaza Valentín Gómez Farías 12, col. San Juan Mixcoac,
Ciudad de México, CP 03730

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

Esta publicación forma parte del proyecto "Plataformas de difusión científica: narrativas transmedia para México" del Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora, proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024.

ISBN formato impreso: 978-607-8273-74-4
ISBN formato digital: en trámite

Distribución gratuita, prohibida su venta

Hecho en México

Presentación

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos garantiza el derecho humano a la ciencia, el cual implica que toda persona pueda gozar de los beneficios del desarrollo de la ciencia y la innovación tecnológica. Con la aprobación en mayo de 2023 de la Ley General en materia de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación y para asegurar el ejercicio de este derecho, el Estado tiene la obligación de fomentar, realizar y apoyar actividades de investigación humanística y científica, desarrollo tecnológico e innovación que redunden en el bienestar del pueblo de México.

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías es la entidad asesora del Ejecutivo Federal que articula las políticas públicas de humanidades, ciencias, tecnologías e innovación (HCTI), con el objetivo de que el conocimiento se traduzca en soluciones sustentables a retos prioritarios para el país. Asimismo, busca fortalecer la independencia científica y tecnológica de México, así como la transición de un sistema energético basado en los combustibles fósiles a uno de bajas emisiones de gases y componentes de efecto invernadero. Para ello, promueve el uso sustentable de las fuentes de energía más eficientes disponibles en cada región del país, así como la mejora continua de las condiciones y eficiencia de las fuerzas productivas, con énfasis en el fortalecimiento de las empresas públicas y los sujetos de la economía social y solidaria.

Por mandato del entonces presidente de México, licenciado Andrés Manuel López Obrador, el Conahcyt coordinó el proyecto "Impulso soberano de la cadena de valor de litio, tecnologías de almacenamiento de energía y semiconductores", con el objetivo de que el Estado mexicano logre la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento del litio,

establecidos en el artículo 10 de la Ley Minera. Para ello, el proyecto se basa en el mejor conocimiento disponible y con los más altos estándares de protección al medio ambiente y respeto a los derechos de los pueblos.

El proyecto tiene como objetivos presentar el estado del arte y el grado de desarrollo en el país de los conocimientos y tecnologías en torno al litio, así como establecer los mapas de ruta para que México desarrolle la prospección geológica, la explotación y la producción de baterías de iones de litio. Además, busca identificar tecnologías disruptivas de almacenamiento de energía que darán ventajas comparativas a la Comisión Federal de Electricidad y a un nuevo sujeto social ávido de participar de manera colectiva en la gestión de la energía. En su conjunto, estas acciones fortalecerán la cadena de valor de las energías renovables en nuestro país.

También se identifican estratégicamente las capacidades del país en materia de semiconductores, con un enfoque integral de aprovechamiento de estas tecnologías en esfuerzos industriales soberanos, con perspectivas también de aplicación en la resolución de retos prioritarios en salud y en medio ambiente para el periodo 2024 al 2030.

Asimismo, se presenta el diagnóstico sobre las capacidades de talento humano especializado, tanto instaladas como potenciales, junto con estrategias para apoyar fuertemente al Plan Sonora, como polo focal ejemplar de desarrollo nacional en energías renovables.

México tiene la posibilidad de desarrollar de manera soberana toda la cadena productiva del litio para la producción de bienes necesarios para la transición energética, como las baterías, así como para otros usos industriales derivados de este metal. Del mismo modo, tiene una comunidad consolidada de especialistas en diversos ámbitos del conocimiento relacionados con este tema y comprometidos con el desarrollo nacional, con la generación de riqueza social y con los más altos estándares ambientales.

El proyecto se enfoca de manera sustantiva en el sector social, pues apunta a atender las necesidades de más de la mitad de la población mexicana, incluyendo a los sectores más vulnerables que utilizan el

transporte público. Además, impulsa la dinamización del mercado interno y orienta a México hacia una producción soberana de autobuses de transporte público eléctrico, cuyo prototipo se ha comenzado a construir y será evaluado en diversas ciudades durante el segundo semestre de 2024. Este esfuerzo se suma a lo alcanzado con el Tren Maya como un claro avance en esta dirección, al electrificar más del 40 % de su ruta.

En 1938, el presidente Lázaro Cárdenas nacionalizó el petróleo y más tarde, en 1960, el presidente Adolfo López Mateos nacionalizó la industria eléctrica. Entonces, México no contaba con una comunidad de personas humanistas, científicas y tecnólogas pujante que ha recibido un renovado y pertinente apoyo a partir del 1 de diciembre de 2018. Estamos ante la oportunidad histórica de construir un nuevo modelo de transición energética de cara a los retos de marginación social y pobreza energética de un sector importante de la población nacional y frente a una crisis climática impuesta por el profundo deterioro ambiental de nuestro país.

La agenda de Estado encabezada por el licenciado. Andrés Manuel López Obrador nos convocó a una nueva forma de velar por el interés público nacional, la soberanía de la patria, el cuidado y restauración del ambiente y el bienestar del pueblo de México desde un desarrollo científico y tecnológico a favor del bienestar de nuestro Pueblo y la grandeza de México.

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces
Directora general, Consejo Nacional
de Humanidades, Ciencias y Tecnologías

Mensaje de Litio para México

Es un gusto ver plasmado en este documento el trabajo colaborativo de especialistas nacionales –muchos de ellos de gran trayectoria– así como de jóvenes investigadoras e investigadores que han sido coordinados por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) en este esfuerzo inédito de documentar la relevancia que tiene para el país la cadena de valor del litio.

En sus páginas encontrarán un análisis profundo y detallado sobre la cadena de valor del litio, comenzando por las consideraciones económicas de la industria. Después se aborda el tema de la prospectiva y exploración geológica, hasta el beneficio y la metalurgia extractiva. Y finalmente se analiza el papel crucial que desempeñan las baterías de ion litio y otras tecnologías de almacenamiento en la transición energética hacia fuentes más limpias y sostenibles. El mapeo de las capacidades nacionales en materia de semiconductores y el del talento especializado son otros temas estratégicos para el desarrollo soberano del país.

Este documento es un testimonio del compromiso de México con el desarrollo de una industria del litio, para que no sólo sea rentable económicamente, sino también respetuosa con el medio ambiente y con una visión de bienestar social. Esperamos que su lectura resulte clara y enriquecedora a la vez.

Pablo Daniel Taddei Arriola
Dirección General de LitioMx

Introducción

En la última década, el litio (Li) se ha convertido en uno de los metales fundamentales en temas de transición energética debido a su aplicación en tecnologías de almacenamiento eléctrico, especialmente en las baterías de ion litio (BIL). La demanda de este metal se triplicó entre 2017 y 2022 y se espera que continúe creciendo en los próximos años.

México se encuentra dentro de los países con reservas de litio certificadas, por lo que el gobierno de México está impulsando acciones para lograr la soberanía nacional en torno a este mineral crítico. En los años 2022 y 2023 se publicaron decretos con modificaciones a la Ley Minera, en los cuales se reconoce al litio como patrimonio de la Nación estableciendo a favor del pueblo de México toda actividad de exploración, explotación y beneficio para impulsar una industria nacional de litio.

En este contexto y por mandato del entonces presidente de México, el licenciado Andrés Manuel López Obrador (2018-2024), el Conahcyt coordinó y desarrolló el presente proyecto "Impulso soberano de la cadena de valor de litio, tecnologías de almacenamiento de energía y semiconductores". Este trabajo constituye un mapa de ruta para desarrollar de manera acelerada una industria nacional a lo largo de la cadena de valor del litio, impulsando primordialmente los objetivos del Plan Sonora de Energías Sostenibles. Asimismo, busca fortalecer la incorporación de las energías renovables en el sistema eléctrico nacional a partir de habilitar tecnologías para el almacenamiento de energía y la oportunidad de desarrollar la industria nacional en semiconductores, entre otras acciones que forman parte de este plan.

El objetivo de esta obra es compartir con la sociedad mexicana cómo el modelo mexicano de innovación soberana para el bienestar desarrollado por el Conahcyt impulsa el desarrollo de la cadena de valor de litio, desde la etapa de exploración geológica, hasta la producción, aplicación y reciclaje de las baterías de ion litio (BIL); además da a conocer las tecnologías alternativas de almacenamiento de energía (TAAE) que se encuentran en desarrollo y las capacidades nacionales en materia de semiconductores y talento humano especializado.

Desde el punto de vista económico, se expone la situación de la producción de litio a nivel mundial, los mercados y los precios de este metal. Se analizan los mercados asociados a cada eslabón de la cadena de valor, como es el caso de los minerales críticos y estratégicos requeridos para la fabricación de BIL, así como los productos obtenidos de la extracción metalúrgica de minerales que contienen litio. También, se exponen los mercados de electromovilidad y su beneficio potencial en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La tendencia creciente de inserción de vehículos eléctricos en la matriz vehicular representa una mayor demanda de recursos y materiales; se estima que, el 87% de la producción de compuestos de litio en el mundo se utiliza para la fabricación de baterías. Por esta razón, la evaluación económica y el desarrollo del reciclaje es un brazo indispensable en la articulación de la cadena de valor (capítulo 1).

En materia de prospectiva y exploración geológica, parte inicial de la cadena productiva de litio, se describe el estado del arte de los yacimientos de litio como una recopilación actualizada de las características geológicas que definen sus distintas tipologías. El conocimiento de depósitos de litio alrededor del mundo y la investigación científica en México permite evaluar las principales zonas con potencial de exploración.

El gobierno mexicano ha incrementado sus esfuerzos para lograr un aprovechamiento soberano de litio y desde el 2023 se ha llevado a cabo una intensa generación de información con bases científicas en materia de exploración regional en Sonora, impulsado por el Conahcyt y en articulación con el Servicio Geológico Mexicano, que también ha generado

información de distintos estados del país. Los resultados generales y objetivos, así como las propuestas de talento especializado requerido en el área de exploración y prospección también se presentan en este libro (capítulo 2).

En México, la principal tipología de los depósitos de litio se encuentra asociada a arcillas, lo cual, debido a las propiedades complejas que posee este tipo de minerales, representa un reto tecnológico al no existir un proceso comercial para su procesamiento y extracción en el mundo. En este sentido, el Conahcyt está impulsando y coordinando los esfuerzos interinstitucionales para definir los procesos metalúrgicos para la extracción de litio de minerales de arcilla. A partir de estos procesos se han definido las rutas metalúrgicas con las que se ha obtenido carbonato de litio de alta pureza, con ahorro en consumo de agua y energía.

Asimismo, se contempla la construcción y puesta en marcha de una planta productiva a nivel piloto para la extracción de compuestos de litio de alto valor proveniente de arcillas, con la posibilidad de incorporar fuentes alternas de minerales de litio, como lo son las salmueras geotérmicas. Consolidada la producción a nivel planta piloto, se propondrá el escalamiento industrial, para tener una industria productiva nacional que provea la materia prima esencial para la fabricación de BIL y otras aplicaciones (capítulo 3).

Respecto a las BIL, se muestra un análisis del estado actual de su funcionamiento, impacto socioeconómico, la importancia para el desarrollo sustentable y la prospectiva de la tecnología. Se exploran los factores críticos de la cadena de valor de las baterías y los compuestos imprescindibles para detonar la fabricación de BIL en México. Además, se presentan las fortalezas en investigación, desarrollo tecnológico e innovación para implementar la industria de BIL en el corto y mediano plazo, favoreciendo la soberanía tecnológica en el sector. En específico, se comparten los esfuerzos en curso para atender el transporte público y con ello la movilidad de más de la mitad de la población en el país, que además es la de menor ingreso (capítulo 4).

México cuenta con muchas fuentes energéticas renovables locales, así como con una amplia comunidad científica y tecnológica que desarrolla nuevas tecnologías de almacenamiento de energía, las cuáles tienen como objetivo ser sistemas que resuelvan el problema de la variabilidad de las energías renovables y permitan su despliegue masivo en distintas escalas al ser flexibles, seguras, confiables y de bajo costo. Por ello, de manera simultánea al desarrollo de las BIL, el Conahcyt, en coordinación con centros de investigación e instituciones de educación superior, impulsa tecnologías alternativas de almacenamiento de energía que contribuyan a la transición energética, tales como: producción y almacenamiento de hidrógeno, electrolizadores, celdas de combustible, baterías de flujo, sales fundidas y dispositivos análogos a las BIL, entre otras (capítulo 5).

El Plan Sonora abre a México la oportunidad de orientar estratégicamente las capacidades del país en materia de semiconductores, chips y obleas con un enfoque integral de aprovechamiento de estas tecnologías en esfuerzos industriales soberanos y con perspectivas de aplicación en la resolución de retos prioritarios en salud y en ambiente. Si bien la industria mundial de semiconductores está concentrada en pocos países y empresas, se han identificado los subsectores que representan un nicho de alto potencial para México. Este es el caso de los sensores, en el que nuestro país cuenta con décadas de experiencia en investigación y desarrollo de materiales y dispositivos en diversos centros públicos e instituciones de educación superior (capítulo 6).

Finalmente, se presenta una radiografía del talento humano especializado de México alineado al Plan Sonora, como un componente indispensable para todos los esfuerzos en materia de transición energética. Las capacidades instaladas y potenciales en cuanto a estudiantes en formación, programas de posgrado, investigadores en consolidación y consolidados son importantes y se tiene la oportunidad de alinearlas y acrecentarlas de manera inmediata al Plan Sonora (capítulo 7).

Por su naturaleza, y de manera renovada, a partir de la promulgación de la Ley General en materia de Humanidades, Ciencias y Tecnologías e

Innovación, el Conahcyt es el brazo científico y tecnológico del gobierno de México. Por ello, para impulsar el desarrollo de una industria nacional en torno al litio y las energías renovables, con un enfoque de soberanía tecnológica, es fundamental que LitioMx siga contando, tanto en estos primeros años como a futuro, con todo el respaldo y asesoramiento del sector humanista, científico y tecnológico del país.

LISTA DE ESPECIALISTAS QUE CONTRIBUYERON DURANTE 2022

DR. JOSÉ JARIB ALCARAZ ESPINOZA
Universidad Autónoma Metropolitana

DR. CARLOS AMADOR BEDOLLA
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. ALÁN ASPURU-GUZIK
Universidad de Toronto

DR. RAFAEL ENRIQUE CABANILLAS LÓPEZ
Universidad de Sonora

ING. JOSÉ CABELLO LECHUGA
Experto chileno independiente

DR. ULISES CANO CASTILLO
Instituto de Electricidad y Energías Limpias

DR. GUILLERMO JAVIER CASTRO LARRAGOITIA
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

DRA. ILSE CERVANTES CAMACHO
Instituto Politécnico Nacional

DR. ROEL CRUZ GAONA
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

DRA. ANA KARINA CUENTAS GALLEGOS
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. LEONARDO DE SILVA MUÑOZ
Investigador por México del Conahcyt

DR. GIOVANNI DE LUNA
De Luna Lithium Battery

DR. JESÚS ADRIÁN DÍAZ REAL
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. LUCA FERRARI
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. JOSÉ ROBERTO FLORES HERNÁNDEZ
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

DRA. MARTHA MAGDALENA FLORES LEONAR
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. JOSÉ LUZ GONZÁLEZ CHÁVEZ
Universidad Nacional Autónoma de México

DRA. ROSA DE GUADALUPE GONZÁLEZ HUERTA
Instituto Politécnico Nacional

DR. IGNACIO GONZÁLEZ MARTÍNEZ
Universidad Autónoma Metropolitana

M. C. ALFONSO MAYRÉN GUTIÉRREZ
Universidad Autónoma Metropolitana

DR. EMMANUEL JOSÉ GUTIÉRREZ CASTAÑEDA
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

DRA. MARGARITA EUGENIA GUTIÉRREZ RUIZ
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. GREGORIO GUZMÁN GONZÁLEZ
Universidad Autónoma Metropolitana

MTRA. FLOR DE MARÍA HARP ITURRIBARRÍA
Servicio Geológico Mexicano

C. ARTURO HERNÁNDEZ SÁNCHEZ
Universidad Autónoma Metropolitana

DRA. GEORGINA IZQUIERDO MONTALVO
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

DR. JESÚS SALVADOR JAIME FERRER
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas

M. C. VALERIA JUÁREZ CASILDO
Instituto Politécnico Nacional

DRA. MARÍA ISABEL LÁZARO BÁEZ
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

DR. FRANCISCO MARTÍN ROMERO
Universidad Nacional Autónoma de México

M. EN C. JOSÉ ISMAEL MINJAREZ SOSA
Universidad de Sonora

DRA. OFELIA MORTON BERMEA
Universidad Nacional Autónoma de México

DR. GUSTAVO MURILLO MUÑETÓN
Instituto Mexicano del Petróleo

DR. JOSÉ LUIS NAVA MONTES DE OCA
Universidad de Guanajuato

DR. ROBERTO PÉREZ GARIBAY
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados.

DR. GABRIEL PLASCENCIA BARRERA
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.

MTRO. ÁLVARO FERNANDO PUIG GODOY
Sociedad Geológica de Chile

DR. ENRIQUE QUIROGA GONZÁLEZ
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

DR. GUADALUPE RAMOS SÁNCHEZ
Universidad Autónoma Metropolitana

DR. EDILSO FRANCISCO REGUERA RUIZ
Instituto Politécnico Nacional

DR. FERNANDO FELIPE RIVERA ITURBE
Universidad Autónoma Metropolitana

DRA. TATIANA ROMERO CASTAÑÓN
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

DR. GILBERTO ROSALES MARÍN
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

DR. EDUARDO MAXIMIANO SÁNCHEZ CERVANTES
Universidad Autónoma de Nuevo León

DRA. PAULA CRISTINA SANTOS MUNGUÍA
Universidad de Sonora

DRA. JULIETA TORRES GONZÁLEZ
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico
en Electroquímica, S. C.

DR. CARLOS TORRES-VERDIN
Universidad de Texas

1. Consideraciones económicas de la cadena de valor de litio

RESUMEN Y MAPA DE RUTA

En la primera sección se hará una revisión de los efectos de la movilidad en el medio ambiente y las tecnologías de sustitución en el transporte.

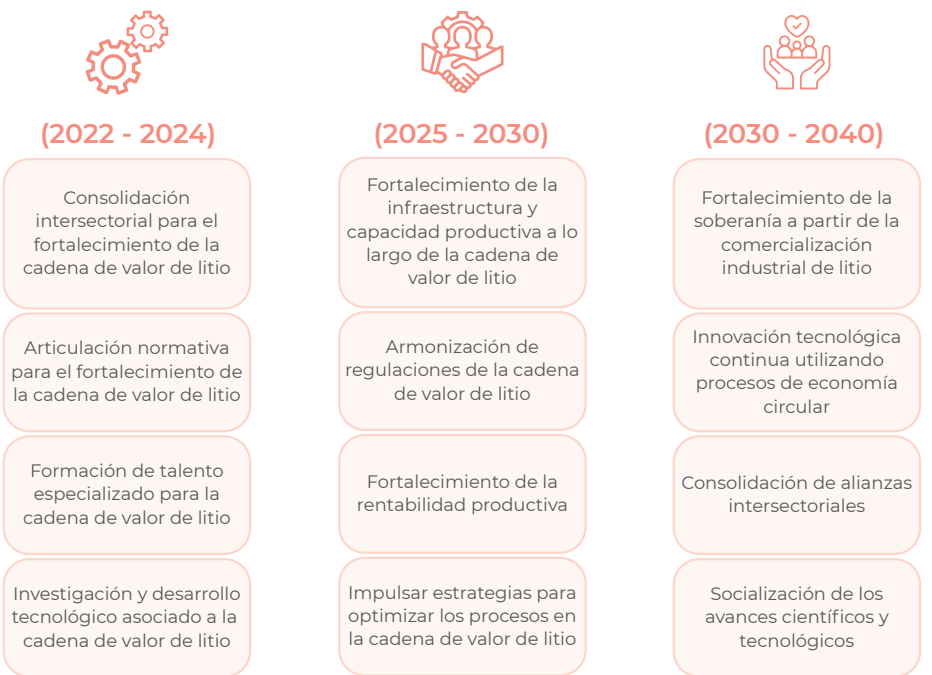
Después se revisará la cadena de valor de litio y la relación que guarda con los mercados respectivos por eslabón. En el primer eslabón de la cadena se estudiarán los minerales estratégicos, entre ellos al litio. Se revisará el concepto, la caracterización de minerales y las condiciones del mercado del litio a nivel mundial; dando lugar al detalle del proceso de exploración de los minerales en el capítulo 2. En el segundo eslabón de la cadena se revisarán los procesos metalúrgicos para la extracción de litio de los minerales que lo contienen, haciendo una revisión de los avances que se tienen al respecto en México en el capítulo 3. En el tercer eslabón se analizará la construcción de las baterías de ion litio (BIL) y su importancia como elemento esencial para la transición energética, lo cual, se revisará con detalle en el capítulo 4, donde también se explicará el desarrollo del mercado del reciclaje de baterías como una alternativa para la proveeduría de litio.

Finalmente se revisará como caso de estudio el mercado de electromovilidad en México, así como un análisis de la posible inserción del país en el último eslabón de la cadena de valor de litio: el reciclaje de baterías.

MAPA DE RUTA

En la figura 1 se presenta la estrategia nacional con la que se planea insertar a México en la cadena de valor de litio. Se planean acciones estratégicas que permitan alcanzar el objetivo en el periodo de 2022 a 2040, dividiéndolo en tres etapas: *1*) de 2022 a 2024 se investigarán y planearán las rutas que permitan alcanzar objetivos específicos, *2*) de 2025 a 2030 se realizarán las primeras acciones políticas y legales para facilitar la construcción y adecuación de la infraestructura necesaria y *3*) de 2030 a 2040 se fomentará la autosuficiencia tecnológica.

Figura 1. Mapa de ruta



Nota: Iconos realizados por Pixel perfect de www.flaticon.com
Fuente: elaboración propia.

INTRODUCCIÓN

Este capítulo analiza los efectos del consumo de combustibles fósiles derivado de las actividades antropogénicas, en especial de las emisiones generadas en el transporte, principalmente del privado, que genera cantidades importantes de emisiones de CO_2. Se propone incentivar el uso del transporte público, promoviendo la movilidad con base de energías más limpias, que reduzcan el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

También se estudia la electromovilidad y el auge en las ventas de autos en los últimos años, a partir de 2021, uno de cada diez autos vendidos ha sido un vehículo eléctrico (VE) (LMC Automotive y EV-Volumes, 2023). Este incremento en las ventas ha generado un aumento en la demanda de metales y materiales para producción de éstos.

Considerando el nicho de oportunidad que deja el mercado de la electromovilidad, el objetivo de este documento es analizar la cadena de valor del litio, estudiar los eslabones productivos que conforman la cadena y revisar la relación que guarda cada proceso productivo con su respectivo mercado y con la interacción de los precios internacionales.

Se hace una revisión del mercado de litio, del mercado de movilidad y electromovilidad, así como del mercado de baterías y del reciclaje de éstas. Finalmente, como un caso de estudio para México se revisa la gestión y generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos como materia prima del proceso de reciclaje de las BIL, analizando los retos y oportunidades de inserción del país a la cadena de valor de litio.

ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

La apuesta por la electromovilidad a nivel internacional es una forma de contribuir con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), uno de los factores causantes del cambio climático. Siguiendo esta estrategia se espera alcanzar el objetivo de mantener el calentamiento

global en el planeta por debajo de dos grados Celsius, respecto a los niveles preindustriales (IPCC, 2022).

En esta sección se analizan los efectos del consumo de combustibles fósiles derivado de las actividades antropogénicas, en especial de las emisiones generadas en el transporte. Se revisa la electromovilidad como una alternativa que abona a la transición energética, entendida, como el uso de sistemas de impulso que utilizan energía eléctrica aplicada al transporte en sus diversas modalidades.

También se analiza la cadena de valor del litio en estos eslabones: exploración geológica, extracción de compuestos de litio y producción de baterías; y los mercados nacionales e internacionales del metal. Además, se estudia el mercado de reciclaje de BIL y el mercado de la electromovilidad.

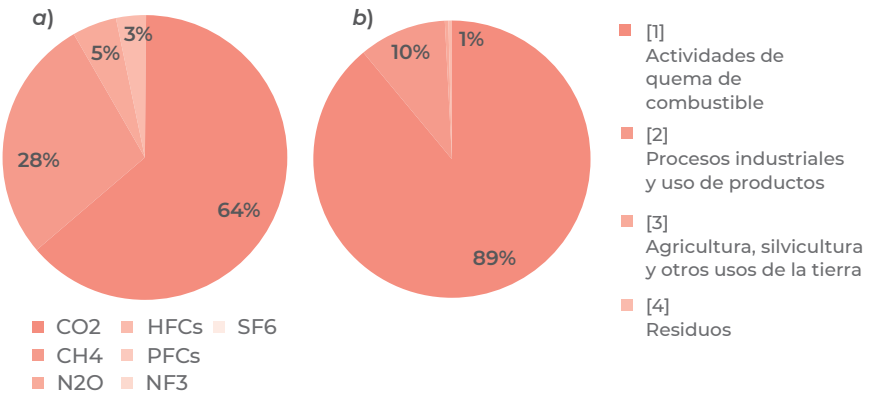
MOVILIDAD Y MEDIO AMBIENTE

El cambio climático es un fenómeno global causado principalmente por la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, resultado de actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la industrialización, entre otras.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en su Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, el GEI que más se emite en el país es el dióxido de carbono (CO_2) con 64%, seguido del metano (CH_4) con el 28% y el resto correspondería a óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFS) y hexafluoruro de azufre (SF_6), (figura 2a). Además de estos GEI, también se contempla el carbono negro –hollín– como un contaminante de la atmósfera. El hollín consiste en partículas contaminantes que se producen por la combustión incompleta de los combustibles fósiles y la biomasa, las cuales, además de contribuir al efecto invernadero, tienen impactos significativos en la calidad del aire y consecuencias críticas para la salud humana. La emisión desmedida de estos gases y compuestos a la atmósfera ha aumentado la temperatura promedio del

planeta, lo cual genera efectos adversos en los ecosistemas, el clima, la disponibilidad de agua y la salud humana.

Figura 2. Emisiones por tipo de gases de efecto invernadero en México



Nota: *a*) Principales emitidos. *b*) Principales actividades que los generan.
Fuente: elaboración propia con datos del IPCC (2023).

Del total de las emisiones de GEI, la mayoría corresponde al consumo de combustibles fósiles (figura 2b). Otras actividades —como los procesos industriales y la producción pecuaria— también aportan un porcentaje significativo. El Inventario Nacional de Emisiones identifica tres principales fuentes de GEI: *1*) automotores que utilizan combustibles fósiles; *2*) actividades de producción y transmisión eléctrica, y *3*) procesos asociados con la ganadería, como la producción de alimento ganadero, la fermentación entérica, los desechos de animales y el cambio en el uso de la tierra.

El Inventario Nacional de Emisiones 2021 identifica al autotransporte como responsable de 19.5% de las emisiones de GEI (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2022). Para el mismo año se estima que circulaban en México 36 millones de autos particulares (incluye automóviles y motocicletas) y 450 mil unidades de transporte público,

esto es, por cada unidad de trasporte público había 91.5 autos privados en el país (Prieto, 2023). La distancia del número de automotores en ambos sectores es grande y por ende la cantidad de emisiones generadas por el sector privado sobrepasa, por mucho, las emisiones del transporte público.

El transporte público es una alternativa de movilidad que permite reducir las emisiones generadas por número de pasajeros, restar costos económicos, disminuir el congestionamiento, atender demandas de movilidad de los sectores de población más desfavorecidos, y lograr una conectividad y movilidad urbana inclusiva y socialmente justa. Otra alternativa a la movilidad sustentable es la electromovilidad pública que además de las características anteriores tiene como principal ventaja la reducción de emisiones directas de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero como metano y óxido nitroso, así como contaminantes locales tales como monóxido de carbono, hidrocarburos, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre, y partículas suspendidas (PMs).

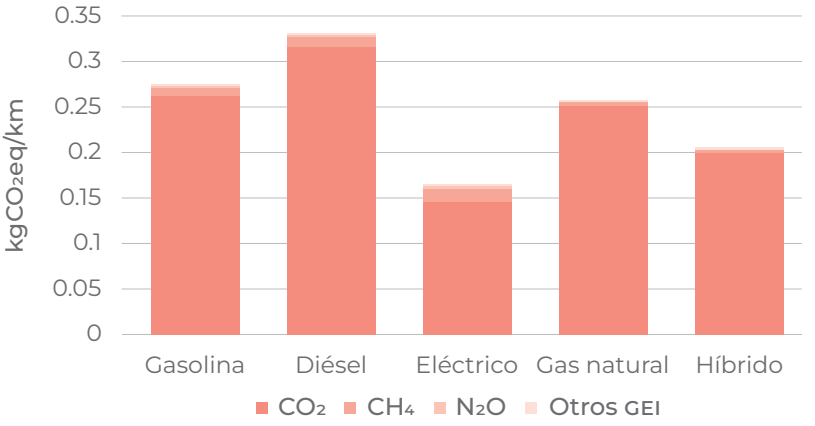
La electromovilidad representa la posibilidad de alcanzar la transición energética para el país, pero su implementación presenta desafíos ambientales, tecnológicos y económicos que deben considerarse, como: la inversión en infraestructura de carga, el costo de los vehículos eléctricos (VE), la disponibilidad de minerales y la gestión y confinamiento sostenible de las baterías de desecho.

Para promover la electromovilidad, como estrategia de reducción de emisiones de GEI, se hacen esfuerzos para incentivar la adopción de VE públicos y privados, como exenciones fiscales y el desarrollo de la infraestructura de carga por parte del sector público en los distintas órdenes de gobierno. Por su lado, las empresas productivas del Estado como la CFE y otras industrias privadas también abonan al proyecto de la movilidad eléctrica. La incorporación de autobuses eléctricos en las flotas de transporte público en varias ciudades del país es un paso importante a la electromovilidad pública. El caso más sobresaliente es la Ciudad de México (CDMX), la cual ha sido reconocida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como un ejemplo mundial en transporte público eléctrico,

gracias a la inversión en la modernización del transporte público en la capital del país hacia el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible rumbo a 2030.

Aunque la implementación de la electromovilidad puede contribuir a la reducción de emisiones de GEI y a la mitigación de los efectos del cambio climático, es importante considerar la generación de contaminantes contabilizando la producción de emisiones de toda la cadena de suministro energético, de la industria automotriz y el impacto en la producción energética. Algunas metodologías que realizan un análisis más completo son: análisis de ciclo de vida, huellas de carbono y huellas de energía. Estas metodologías incorporan información y evalúan la pertinencia ambiental sostenible que ayuda a la toma de decisiones. Por ejemplo, en el análisis de ciclo de vida de la figura 3 se muestra una comparativa de emisiones de GEI entre diversas fuentes de energía, se observa que los VE también tienen un impacto ambiental –se requiere que la electricidad consumida por los automóviles se genere con fuentes renovables– aunque en menor medida en comparación con los vehículos de combustión interna.

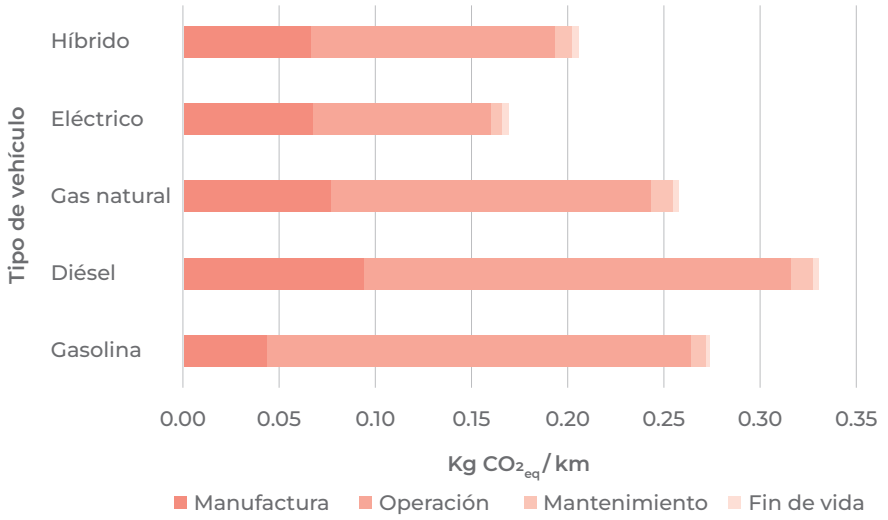
Figura 3. Contribución por GEI a las emisiones en el ciclo de vida de vehículos de carga ligera



Fuente: INECC (2017).

La producción de cualquier tipo de vehículo, ya sea eléctrico o de combustión interna, tiene un impacto ambiental significativo. La producción de automóviles consume grandes cantidades de energía –para producir las baterías y otros componentes electrónicos–, así como recursos naturales que producen emisiones contaminantes. La figura 4 muestra que el mayor impacto durante el ciclo de vida de un VE es durante su manufactura, el proceso de generación de energía para su operación y en el manejo de los residuos sólidos que se generan, incluyendo los residuos de la batería al final de su vida útil.

Figura 4. Evaluación de impacto del ciclo de vida de los vehículos de carga ligera en México

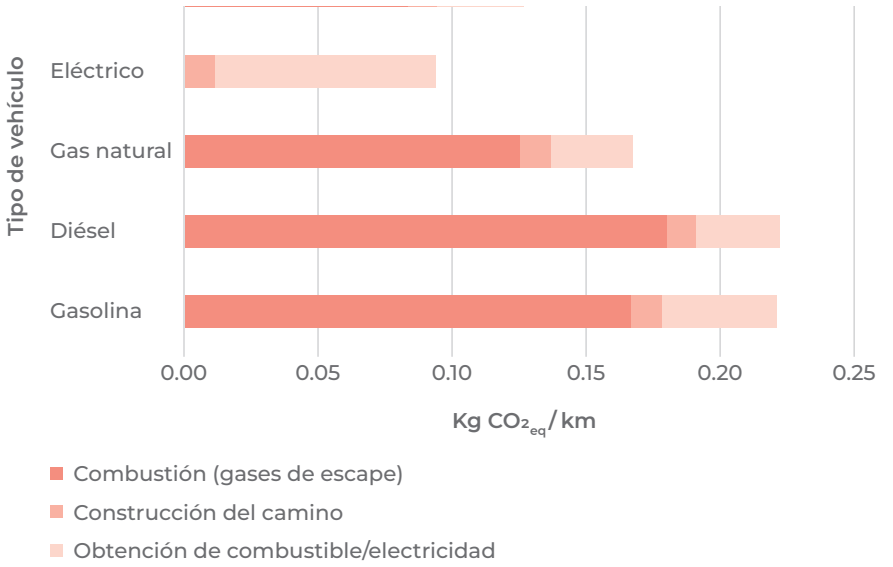


Fuente: INECC (2017).

Si bien un VE no produce GEI durante su funcionamiento (figura 5), la obtención de la energía para su carga tiene un porcentaje considerable

en la producción de CO_2eq[1]. En este sentido, para que la electromovilidad se considere una estrategia completa para enfrentar el cambio climático y reducir las emisiones de GEI, la generación de electricidad utilizada para cargar los VE también debería provenir de fuentes limpias para aumentar los beneficios ambientales. En este sentido, la implementación de la electromovilidad con enfoque en vehículos particulares y públicos podría contribuir a mitigar la producción de GEI.

Figura 5. Emisiones de gases de efecto invernadero durante la etapa de operación de los vehículos de carga ligera o particulares



Fuente: INECC (2017).

1 Una tonelada de litio metálico (Li) equivale a 5323 toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE).

Además de las emisiones de GEI generadas en el proceso productivo del automotor, habrá que considerar las emisiones generadas en la extracción mineral y en su transporte, que utiliza energía fósil para mover el material a procesar. Se estima que se consume un litro de diésel para mover 100 metros del material extraído (Ferrari, 2022).

En términos de emisiones de GEI se espera que la implementación de vehículos eléctricos pueda reducir las emisiones respecto a los vehículos de combustión interna; el monto de la reducción dependerá de la fuente de donde provenga la energía eléctrica y de los avances tecnológicos en la extracción. Además de los avances tecnológicos, se debe acompañar de una política pública que impulse el transporte público eficiente, seguro y amigable con el medio ambiente, además de generar incentivos para la sustitución de los autos particulares. Es necesario considerar que el transporte público ocupa 50 veces menos espacio y emite un 70% menos emisiones de CO_2 que el auto particular (Eco-unión, 2010).

CADENA DE VALOR DE LITIO

Una cadena de valor es la conceptualización del modelo en que se desarrollan las acciones y actividades de una empresa, generalmente se inicia con materia prima y llega hasta la distribución del producto terminado. La cadena de valor se integra por eslabones o etapas productivas y estas varían según el objetivo de la empresa. Los eslabones se entienden como el proceso especifico de la cadena de producción que le añade valor a la cadena (Instituto Nacional de la Economía Social [Inaes], 2019).

La cadena de valor de litio genera diversos productos. Alrededor del 80% del litio que se produce en el mundo se utiliza para la fabricación de baterías de ion litio (USGS, 2023). Sin embargo, tiene otras aplicaciones como la fabricación de vidrio y cerámica, grasas lubricantes, metalurgia básica y elaboración de polímeros, entre otros usos.

La cadena de valor de litio se puede dividir en varios eslabones; para algunos autores la cadena consta de cinco etapas: *1*) la extracción de

materiales, *2*) metalurgia, *3*) construcción de electrodos, *4*) construcción de celdas y *5*) empaquetamiento de baterías (Mayyas et al., 2019). Para otros autores, la cadena está compuesta de cuatro pasos: *1*) preparación de precursores, *2*) proceso de sinterización del cátodo, *3*) fabricación de celdas y *4*) montaje de empaques de batería (Jones et al., 2021).

Sin embargo, en el análisis de la cadena de valor del proyecto que aquí se realiza, se identifican tres eslabones productivos:

1. Prospección, exploración de minerales de litio y otros elementos críticos, cuyos procesos se abordarán en el capítulo 2,
2. Beneficio y metalurgia extractiva de litio, detallada en el capítulo 3.
3. Fabricación de electrodos, celdas y baterías de ion litio lo cual se analiza en el capítulo 4 de este documento.

Además de los eslabones tradicionales en la cadena de valor, se considera el reciclaje y reúso de las BIL, como un eslabón importante a tomar en cuenta, el cual se describe en este capítulo. En la figura 6 se observa la cadena de valor y el mapa de ruta propuesto para desarrollar la industria nacional de litio enfocado al desarrollo de BIL.

Mercados de minerales críticos y estratégicos

Las reservas de elementos metálicos a nivel mundial se encuentran en una etapa de alta demanda. Algunos elementos requieren un mayor esfuerzo de exploración, ya que se encuentran distribuidos sólo en algunos países donde las reservas minerales se encuentran en declive frente al auge de su demanda, cuyo mercado también está expuesto a grandes fluctuaciones en los precios, provocado por el desequilibrio entre la oferta y la demanda (Gielen, 2021). Algunos de estos minerales se encuentran en el grupo de los llamados minerales críticos y estratégicos. En el contexto de las tecnologías de almacenamiento de energía (BIL) y transición energética, varios de estos minerales son esenciales para la producción de sus componentes.

Figura 6. Cadena de valor de litio



Fuente: elaboración propia.

Los conceptos de minerales críticos y estratégicos han sido usados desde los años 30 para referirse a minerales esenciales en la industria de la defensa nacional, sobre todo de los Estados Unidos. En 1979, el gobierno estadounidense definió los minerales estratégicos y críticos como aquellos que: *a*) fueron necesarios para el campo militar, industrial y civil en los EE. UU. en tiempo de emergencia y *b*) no se encontraban o producían dentro de los EE. UU. en las proporciones necesarias para suplir la demanda (Haglund, 1984).

Los elementos críticos son aquellos difíciles de sustituir a corto plazo, empleados por un gran número de sectores industriales, por lo que la posible escasez en su suministro supone un riesgo con un impacto sobre la economía nacional o internacional. Para algunos elementos, sus reservas y su producción están concentradas a nivel geográfico (p. ej. cobalto, litio, tierras raras, agua y gas, entre otros).

La criticidad de los elementos o minerales se basa en distintos parámetros establecidos por cada país, en función de sus necesidades económicas, de seguridad y avance tecnológico. Los parámetros que se utilizan para determinar el grado de criticidad incluyen: *1*) riesgo de

escasez de suministro, oferta-demanda, reciclaje, potencial y ambiental; lo que puede impactar de manera directa en la economía de un país; *2*) baja rentabilidad de explotación; *3*) disponibilidad del mineral, desde el punto de vista geológico, técnico, socioambiental, político y económico; *4*) producción, la cual se encuentra en todos los casos por debajo de la demanda interna, lo que a su vez genera la necesidad de importación; *5*) demanda futura esperada o desarrollo histórico del mercado; *6*) el mineral debe ser esencial para la manufactura de productos de importancia económica; *7*) seguridad minera, y *8*) desarrollo de las cadenas de valor (Committee on critical mineral impacts on the u. s. Economy, 2008; Graedel et al., 2015; Hatayama y Tahara, 2015; Glöser-Chahoud et al., 2016; Ministerio de minas y energías, 2019; Eheliyagoda et al., 2020; Zappettini, 2021; Yan et al., 2021; Giese, 2022; Agusdinata y Liu, 2023; Grohol et al. y Veeh, 2023).

Los elementos críticos pueden ser o no estratégicos. Son identificados por un Estado —o una empresa— que los considera esenciales para su política económica o para cuestiones de soberanía nacional. Son minerales que se implementan en temas militares, energéticos o económicos. Se trata de un concepto político más que industrial, y por ende puede disentir de las realidades económico-industriales. Es la base de la política exterior de algunos países sobre los principales territorios productores de algunas materias primas, como hidrocarburos, litio, oro, agua, algodón, té y maíz, entre otros.

Se consideran críticos a los elementos que no existen en el país o que, aun habiendo concentraciones conocidas, no es posible extraerlos de modo rentable, o bien su producción no satisface la demanda interna, por lo que se deben obtener del exterior. Se consideran elementos estratégicos todos aquellos minerales utilizados en la industria por sus particulares propiedades intrínsecas, cuando sus reservas son muy codiciadas por los países industrializados (Grohol et al. y Veeh, 2023).

Algunas de las características de los minerales estratégicos que los distinguen de los minerales críticos son: *1*) minerales importados a gran escala;

2) incremento actual o a futuro en la demanda global, sobre todo para el uso sostenido de alta tecnología; *3*) ventaja natural de ciertos países en el mercado global, es decir, la distribución geográfica y geológica de yacimientos brindan una ventaja a los países que albergan las principales reservas; *4*) importancia en el desarrollo industrial, y *5*) pocas posibilidades de sustitución (Zappettini, 2021; Calvo y Valero, 2022; Grohol et al. y Veeh, 2023).

Litio como mineral crítico y estratégico

El litio es un elemento utilizado de forma principal en compuestos que son insumos para la fabricación de materiales como cerámicas, vidrios, lubricantes, caucho sintético, concretos especiales, aleaciones de litio-aluminio, fármacos y baterías para equipos electrónicos y auto eléctricos (Kesler et al., 2012). En México y otras regiones del mundo, la transición energética ha impulsado la electromovilidad y en consecuencia la fabricación de BIL, además del desarrollo de políticas para afrontar la demanda creciente de vehículos eléctricos, lo que detonó el aumento en la demanda de litio.

Los cambios necesarios para alcanzar la transición energética requieren, en primer lugar, un aumento en la producción de minerales para el desarrollo de tecnologías. Esta creciente demanda se refleja en los minerales críticos y estratégicos, que deben cubrir las necesidades de dos sectores globales: *1*) la implementación de energías renovables en la matriz energética global, entre ellas la energía eólica, solar y plantas solares fotovoltaicas o de energía concentrada, además de la implementación de nuevas tecnologías que reduzcan la huella de carbono asociada al transporte a través la electromovilidad, y *2*) el desarrollo de tecnologías de telecomunicaciones.

En este contexto, el litio y otros minerales como el cobalto o las tierras raras se identifican como minerales críticos y estratégicos, tres cuartas partes de la producción la concentran los tres principales países con reservas de estos elementos International Energy Agency [IEA], 2022). En

la tabla 1 se presentan los minerales considerados críticos y estratégicos, así como los principales países productores a nivel mundial.

Tabla 1. Lista de minerales críticos y estratégicos a nivel mundial

MINERALES CRÍTICOS/ ESTRATÉGICOS*	REPORTES				PRINCIPALES PRODUCTORES (2022-2023)
	UNIÓN EUROPEA [1]	AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA [2]	ESTADOS UNIDOS [3]	MÉXICO [5]	
Aluminio/ bauxita					Australia[3]
Antimonio					China[3]
Arsénico					Perú[3]
Barita					India[3]
Berilio					Kazajistán [3]
Bismuto	*				EE. UU.[3]
Boro/Boratos	*				China[3]
Cobalto	*				Congo[3]
Carbón					China[1]
Feldespato					India[3]
Fluorita					China[3]
Galio	*				China[1]
Germanio	*				China[3]
Hafnio					China[3]
Helio					EE. UU.[1,3]
HREEs	*				China[3]
LREES	*				China[3]
Litio	*				Australia[3]
Magnesio	*				China[3]
Manganeso	*				Sudáfrica[3]
Grafito	*				China[3]
Niobio					Brasil[3]
PGM	*				Sudáfrica[3]

MINERALES CRÍTICOS/ ESTRATÉGICOS*	REPORTES				PRINCIPALES PRODUCTORES (2022-2023)
	UNIÓN EUROPEA [1]	AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA [2]	ESTADOS UNIDOS [3]	MÉXICO [5]	
Fosfatos					China[3]
Cobre	*				Chile[3]
Fósforo					India[3]
Escandio					China[3]
Silicio	*				China[3]
Estroncio					Irán[1]
Tántalo					Congo[3]
Titanio	*				China[3]
Tungsteno	*				China[3]
Vanadio					China[3]
Níquel	*				Indonesia[3]
Cromo					Sudáfrica[3]
Zinc					China[3]
Uranio					Canadá [4]
Indio					China[3]
Paladio					Rusia[3]
Telurio					China[3]
Estaño					China[3]
Ytrio					China[3]
Zirconio					Australia[3]

Nota: *Materiales estratégicos.
Fuentes: (European Comission Study, 2023), (International Energy Agency IEA, 2022), (USGS, 2023 y (World nuclear association, 2023).

México cuenta con dos minerales críticos y estratégicos, según lo visto en la tabla 1, litio y uranio. En el caso de litio mexicano, el proyecto de extracción requiere estudiar los costos de producción y los precios del mercado. Antes de considerar invertir en esta parte de la cadena de valor de

litio, es fundamental revisar las ventajas competitivas de los salares en Latinoamérica y los costos de extracción en los depósitos de arcillas.

Por otro lado, la demanda a nivel mundial del cobalto y litio es de 200 y 350 000 toneladas, respectivamente, y sus reservas probadas actuales son de 180 y 370 000 toneladas, respectivamente. Lo que indica un déficit que no puede cubrir la oferta de las reservas actuales del mineral (ICCT, 2021); además la extracción de varios materiales críticos para la producción de BIL está comprometida para los próximos siete años (Fastmarkets, 2023).

Para el caso del litio, la escasez y las negociaciones internacionales en la distribución de la materia prima, se convierte en una barrera a la entrada de nuevas inversiones. La entrada a la adquisición de materia prima para la producción de baterías inevitablemente significará un cambio en los precios de ese material. La IEA presenta dos escenarios para mostrar los efectos de la electromovilidad extendida en la demanda de algunos materiales críticos.

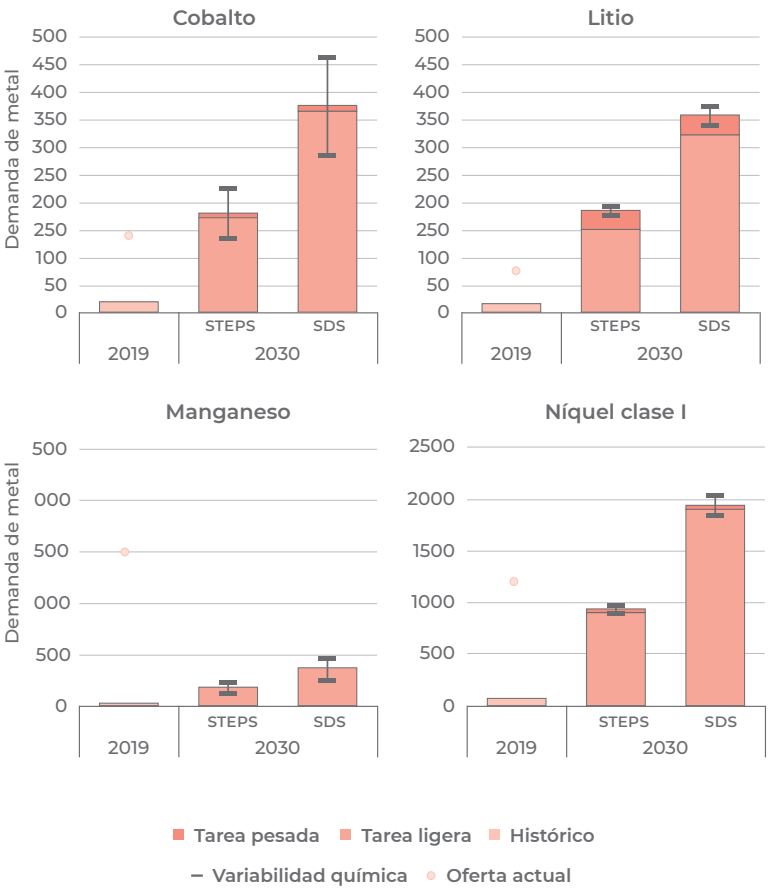
El primer escenario —STEPS— es el supuesto de una política extendida a favor de la sustitución de autos de combustión interna por autos eléctricos; aqui, la demanda de cobalto para el año 2030 se expande a 180 kilotonelada al año (KT/año), el litio 185 KT/año, el manganeso 177 KT/año y el níquel 925 KT/año. En el segundo escenario, correspondiente al de desarrollo sostenible -SDS-, se pretende que para 2030 se sustituyan los automotores por motores eléctricos, en ese caso se requerirá el doble de lo demandando por el escenario STEPS, ver figura 7 (IEA, 2020).

Precios de mercado de materiales

Con el crecimiento de los precios de los metales, sobre todo el cobalto, el sector automotriz ha solicitado contratos fijos de largo plazo a las empresas cotizantes, pero también ha considerado, con mayor fuerza, la

posibilidad de reciclar materiales (sobre todo el litio y cobalto), para mitigar el impacto económico en sus utilidades.

Figura 7. Demanda anual de materiales de batería de litio, 2019-2030



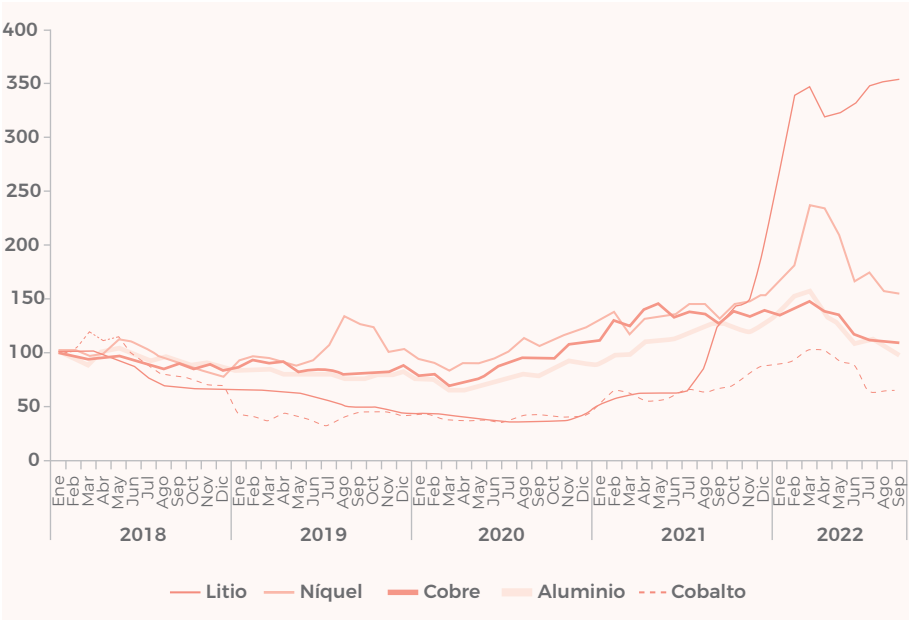
Nota: 1000 toneladas es una kilotonelada (KT); STEPS = escenario de políticas declaradas; SDS = escenario de desarrollo sostenible (por sus siglas en inglés).
Fuente: adaptado de IEA, 2020.

El precio del cobalto, reportado en la Bolsa de Metales de Londres, cayó gradualmente de $ 40 000 a $ 23 000 dólares por tonelada entre 2010

y finales de 2016, antes de subir abruptamente a más de $80000 dólares por tonelada a principios de 2018 (Mayyas et al., 2019). Por otro lado, los precios del níquel han llevado la misma tendencia en forma de "U", no así el grafito, que por ser un material abundante no refleja ningún cambio en los costos para la construcción de BIL.

En la figura 8, se muestran los precios del litio, el cobalto y el níquel, entre otros necesarios para la fabricación de las baterías. Los dos primeros, litio y cobalto, son los metales con mayor escasez en el mercado y los precios indican la incertidumbre en el futuro.

Figura 8. Variación de precios de minerales seleccionados, 2018-2022



Nota: Los índices de precios de los metales seleccionados se calculan con el precio de cierre del último día hábil del mes. El índice de precios del litio (carbonato, grado batería, 99.5%) se calcula a partir del precio promedio entre los precios de los EE. UU. y China, mientras que los índices de precios del aluminio, el cobalto, el cobre y el níquel se calculan a partir de los precios en efectivo de estos metales en la Bolsa de Metales de Londres (BML).
Fuente: CEPAL, 2023a.

MERCADO DEL LITIO

En esta sección se explica brevemente cómo funcionan las transacciones del mercado internacional debido a que, en México, aún no existe extracción y producción propia, sin embargo, se está impulsando la investigación para poder participar de manera competitiva y soberana en el mercado internacional de litio.

En contraste con los mercados tradicionales, en donde productores y consumidores se encuentran para realizar intercambios, el mercado de litio es un espacio virtual en donde las transacciones se realizan a través de intermediarios en mercados internacionales, *brokers* de la materia prima. Un *broker o corredor* es una persona o entidad que facilita la compra y venta de activos financieros como acciones, bonos o divisas, actuando como intermediario entre compradores y vendedores, y firmando contratos a largo plazo (SE, 2014). Los *brokers* son quienes buscan a los productores de la materia prima en el mundo para colocarla en mercados internos. El pago por el servicio de la intermediación se agrega al precio final del litio que paga el demandante, lo que eleva el precio que se debe solventar.

Producción y reservas a nivel mundial

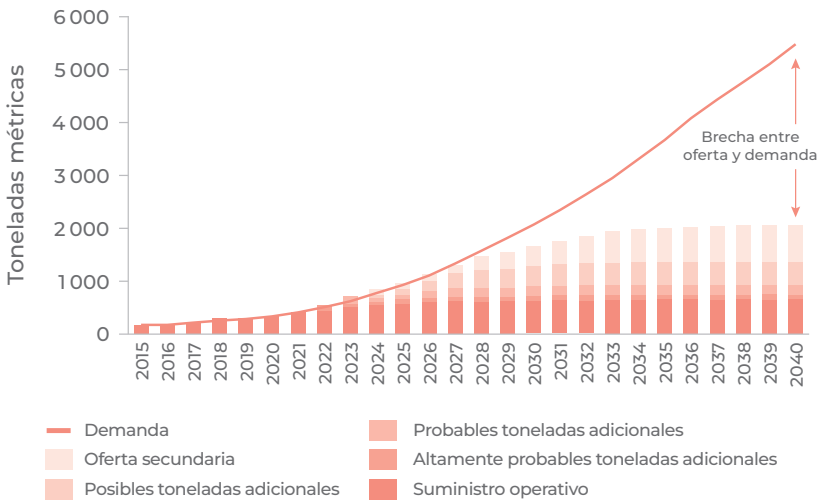
La incierta producción de algunos materiales críticos para la fabricación de BIL, especialmente el litio, ha generado una brecha entre la oferta y la demanda que, con el tiempo, se ha hecho cada vez más grande. Las proyecciones de la CEPAL indican un déficit de oferta del litio, así como algunos productores de Li estiman que se debe duplicar la producción cada dos o tres años para satisfacer la demanda esperada para 2030 (Fastmarkets, 2023).

En la figura 9 se observa que, la brecha entre la oferta y la demanda del mercado mundial de litio será mayor a 3000 toneladas para el año 2040, aun considerando las reservas probadas, probables y posibles, más la oferta secundaria y el reciclaje, no será suficiente.

La discontinuidad entre la oferta y la demanda de litio puede generar afectaciones en la cadena de suministro para la fabricación de BIL. Además, hay otros temas a considerar en las proyecciones de disponibilidad de litio, tales como: la capacidad de producción, el mercado, conflictos geopolíticos y la disponibilidad de recursos.

A pesar de lo anterior, el Servicio Geológico de los Estados Unidos tiene una opinión positiva en las ofertas futuras, puesto que asegura que en los próximos años las reservas mundiales de litio, entre otros materiales, serán superiores a las actuales. Los recursos de litio identificados han crecido 98 millones de toneladas, resultado de la creciente demanda del mineral litio (U.S. Geological Survey, 2023).

Figura 9. Demanda y oferta de litio (toneladas métricas), 2015-2040



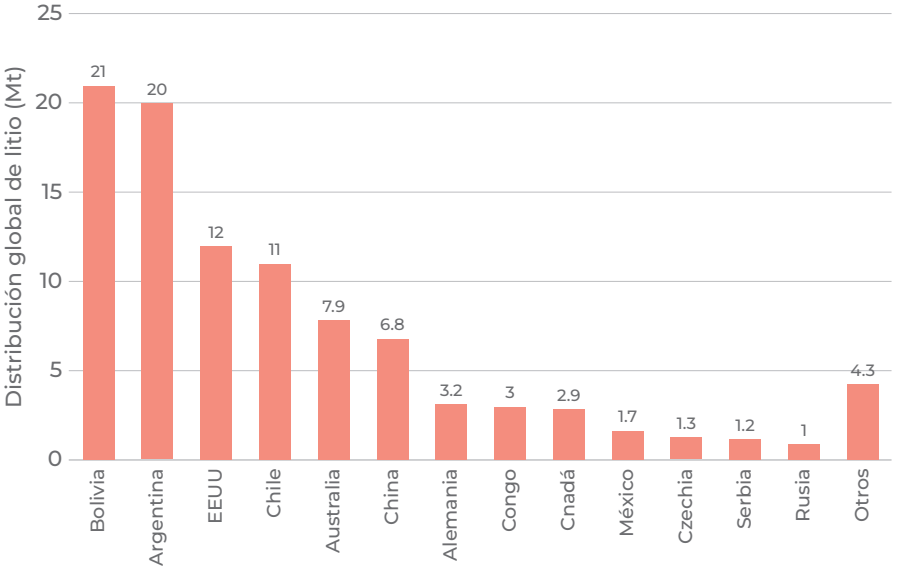
Fuente: adaptado de ICCT, 2021.

Por otro lado, la producción actual de litio se distribuye en los siguientes recursos en la naturaleza: salmueras (~64%), pegmatitas (~29%) y

arcillas (~7%). Alrededor del 80% de la producción mundial de litio proviene de operaciones en Australia –espodumena– y Chile –salmueras de salares– (Zhao et al., 2023).

Las salmueras y salares son la fuente primaria de producción de carbonato de litio en el mundo, debido a sus bajos costos de extracción comparados contra las demás rutas. Las mayores reservas de litio también se encuentran en este tipo de yacimientos. Chile, Argentina, Bolivia y China son los principales países con este recurso. Tomando en cuenta la producción en volumen de minerales de litio extraídos, las pegmatitas de Australia ocupan el primer lugar.

Figura 10. Distribución de recursos identificados y medidos de litio en el mundo



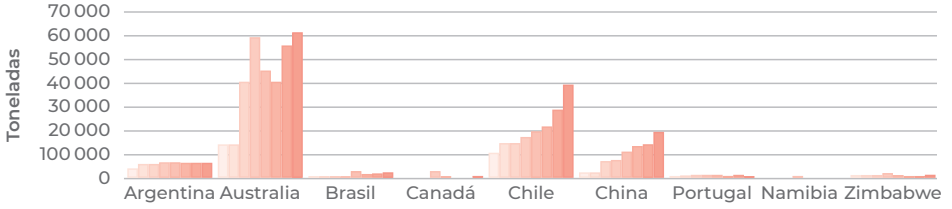
Fuente: elaboración propia con base en USGS (2023).

En la figura 10 se muestran los países con los mayores recursos identificados y medidos de litio en 2022, los cuales se distribuyen de la siguiente

manera: Bolivia, 21; Argentina, 20; Chile, 11; Australia, 7.9; China, 6.8; Alemania, 3.2; Congo, 3; Canadá, 2.9; México, 1.7; República Checa, 1.3; Serbia, 1.2; Rusia, 1; Perú, 0.88; Mali, 0.84; Brasil, 0.73; Zimbabue, 0.69, España, 0.32; Portugal, 0.27; Namibia, 0.23; Ghana, 0.18; Finlandia 0.068; Austria, 0.06 y Kazajistán, 0.05 (todo en toneladas métricas, Mt).

En cuanto a la producción mundial de litio, de 2015 a 2022 hubo un crecimiento de más de cuatro veces, de 31 500 a 131 000 toneladas. (U.S. Geological Suvey, 2023). Este crecimiento viene acompañado de una reorganización mundial de la demanda (la variación más importante se ha dado en 2022). Por ejemplo, en Brasil la extracción pasó de 200 toneladas a 2 200 toneladas, aumentando diez veces en comparación a la extracción de 2015. Otro cambio importante ocurrió en China, donde ha crecido su producción más de nueve veces, pasando de 2 000 a 19 000 toneladas métricas. En el caso de Australia, pasó de 14 100 mil a 61 000 toneladas, representando un crecimiento cuatro veces mayor a la producción de 2015 (tabla 2).

Tabla 2. Producción de litio 2015-2022

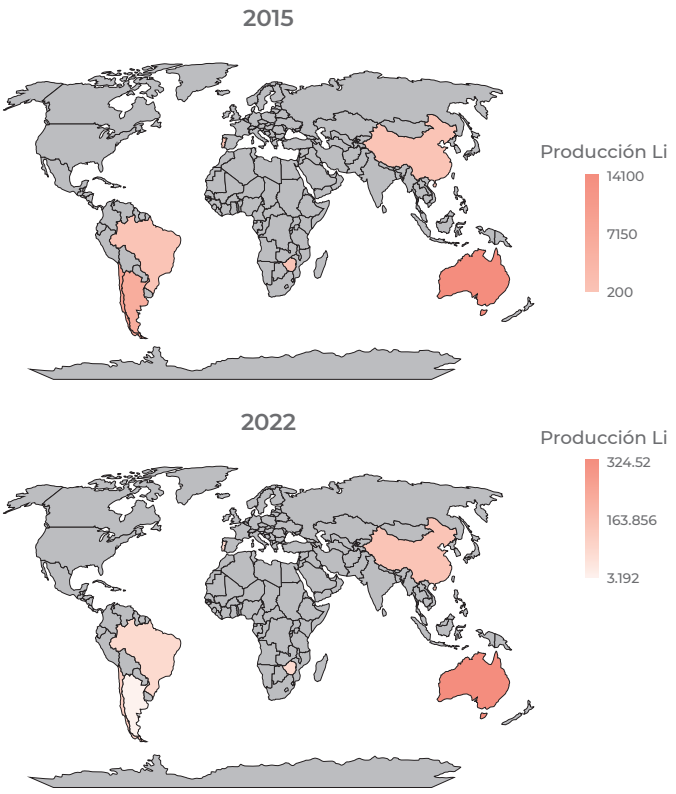


	Argentina	Australia	Brasil	Canadá	Chile	China	Portugal	Namibia	Zimbabwe
2015	3 600	14 100	200		10 500	2 000	200		900
2016	5 800	14 000	200		14 300	2 300	400		1 000
2017	5 700	40 000	200		14 200	6 800	800		800
2018	6 400	58 800	300	2 400	17 000	7 100	800	500	1 600
2019	6 300	45 000	2 400	200	19 300	10 800	900		1 200
2020	5 900	39 700	1 420		21 500	13 300	348		417
2021	5 970	55 300	1 700		28 300	14 000	900		710
2022	6 200	61 000	2 200	500	39 000	19 000	600		800

Fuente: elaboración propia con base en USGS (2015-2022).

Los cambios en la geopolítica del mundo en los últimos ocho años, 2015-2022, han impactado en la extracción del litio, lo cual se representa con los mapas de la figura 10. De 2015 a 2020 Australia ha sido la potencia mundial en extracción de litio, a través de pegmatitas mineralizadas. Véase el capítulo 2 para mayor detalle de este tipo de yacimientos.

Figura 11. Reestructuración geográfica de las reservas de litio, 2015-2022



Nota: Argentina reestructuró su participación, pasando de una producción media en 2015 a una mínima en 2022, en proporción a la producción total mundial; pero, en términos reales, la producción de Argentina sigue creciendo, sólo que a una tasa menor a la que crece la extracción total de litio. El ejemplo contrario es China, que aumenta la extracción de litio, como se ve en los mapas, que pasa de una producción baja a una producción media de 2015 a 2022.
Fuente: elaboración propia con base en U. S. Geological Survey.

Aunque las reservas han crecido en los últimos años, no hay seguridad de que en el futuro se reúna la cantidad necesaria para realizar la transición energética en el mundo y cubrir la demanda internacional que las baterías de los vehículos eléctricos requieren.

Además de la incertidumbre de la extracción futura de litio, debe de considerarse que, de continuar con el actual nivel de demanda de extracción se podría acelerar el acercamiento a los límites planetarios, entendido como la presión que ejercen las actividades antropogénicas dentro de la capacidad de autorregulación de la Tierra. Hay investigaciones que aseguran que ya se han rebasado seis de los nueve limites planetarios como lo sustenta Richardson (2023). Por tanto, la extracción de litio no sólo debe responder a la presión de los mercados internacionales de electromovilidad privada; por el contrario, por tratarse de un bien escaso y estratégico, se requiere canalizar este recurso, a la electromovilidad de transporte público.

Por otro lado, las preocupaciones del sector industrial sobre la grave escasez de materiales, el riesgo geopolítico y la gobernanza, han llevado a buscar alternativas a la minería y los productos químicos tradicionales, en este sentido el reciclaje de baterías de litio se presenta como una alternativa para contrarrestar y contribuir a la demanda de compuestos de litio.

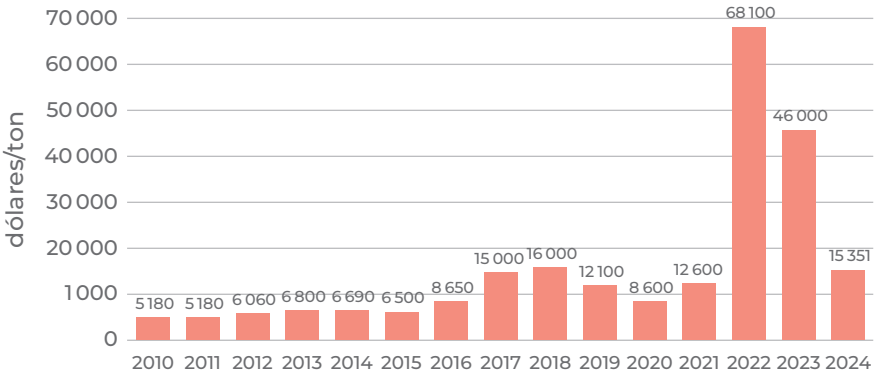
Precios de mercado del litio

El precio del litio es el resultado del consenso de empresas privadas comprometidas a contratos de largo plazo de materias primas; no se comporta como un metal con transacciones en la bolsa de metales internacionales. Una característica importante es que el precio es una aproximación del valor asociado a distintos compuestos de litio, diferentes calidades de material y de los diversos lugares en donde se producen las operaciones (CEPAL, 2023a).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos ha publicado en sus reportes anuales más recientes los precios spot, el precio corriente, es decir, el que se da de manera inmediata en la transacción del carbonato de litio y

del hidróxido de litio (materia prima esencial para la fabricación de BIL). Los precios spot del litio de 2023 se encuentran cerca de los máximos históricos, los cuales han crecido más de seis veces en este periodo, viéndose influenciados por las limitaciones de la oferta (figura 12).

Figura 12. Promedio anual de precio de carbonato de litio (dólares/tonelada), 2010-2024



Nota: Los datos de 2024 es un estimado del promedio de los meses de enero y febrero de Fastmarkets.
Fuente: elaboración propia con base en Geological Survey 2015, 2017, 2019, 2021, 2023 y 2024; y Fastmarkets, 2024.

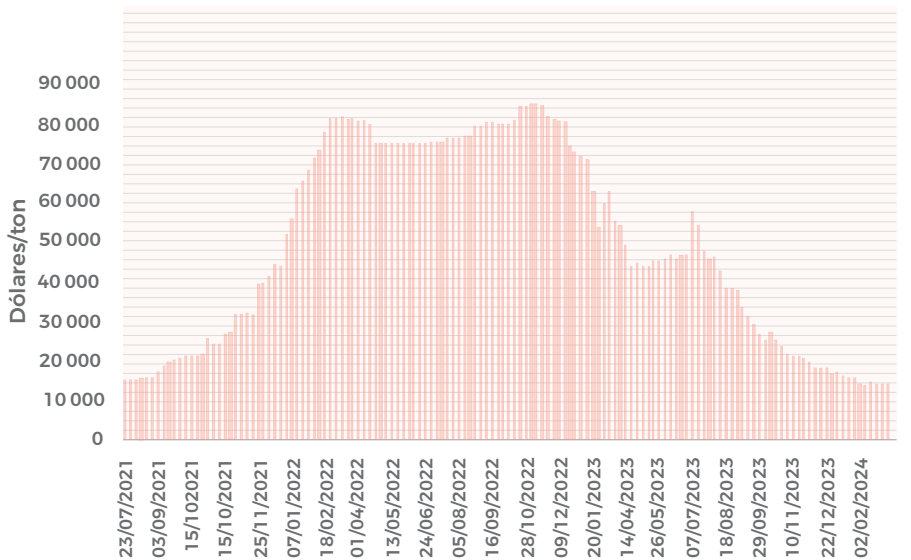
De acuerdo con Fastmarkets, los precios *spot* de hidróxido de litio, (LiOH) de grado batería fueron inestables de 2021 a 2024 (figura 13). En 2023 se alcanzó un máximo de 85000 dólares y un mínimo de 13700 dólares por tonelada al 9 de febrero de 2024. Entre 2022 y 2023 hubo una meseta de precios máximos que se diluyó a inicios de 2023,lo que hizo caer los precios de manera acelerada durante ese año. A partir de febrero de 2024 los precios comenzaron a aumentar lentamente, con una tendencia creciente.

MERCADO DE BATERÍAS DE LITIO (BIL)

Las BIL tienen un mercado maduro que inició desde la década de los 90. Aunque han surgido diferente desarrollos tecnológicos de esta invención,

se destaca en particular la evolución acelerada de la electrónica portátil. Aunque el mercado actual de baterías de dispositivos móviles está llegando a una situación de saturación, otros —como el del almacenamiento de energía portable y de red, así como de dispositivos de mayor potencia— están aumentando a la par que el de la electromovilidad. La figura 14 muestra las tres áreas principales de aplicación de BIL, *1*) electrónica y dispositivos de consumo, *2*) transporte y *3*) energía de la red y la industria (Ding et al., 2019).

Figura 13. Precios mensuales de hidróxido de litio (dólares/tonelada), 2021-2024

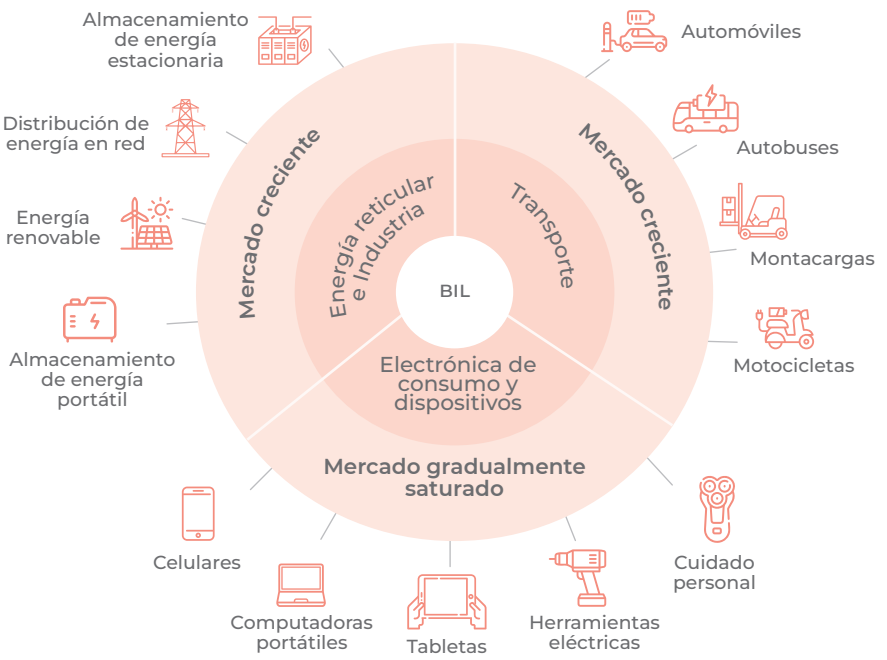


Fuente: adaptado de Fastmarkets, marzo 2024.

De acuerdo con Liu et al., (2022), estos mercados muestran una tendencia incremental de las BIL para el sector de los vehículos eléctricos (VE), así como su predominancia por encima del sector de la electrónica (figura 15). Otros sectores, como el de la energía estacionaria de respaldo a casa habitación e industria, tienen cada vez una mayor presencia y su

tendencia —aunque a un ritmo menor— también es de orden creciente. Como se observa en la figura 15b, China disminuirá de forma gradual el porcentaje de la industria de baterías, mientras que el resto del mundo aumentará paulatinamente su participación.

Figura 14. Aplicaciones de las baterías de ion litio en las tres áreas principales

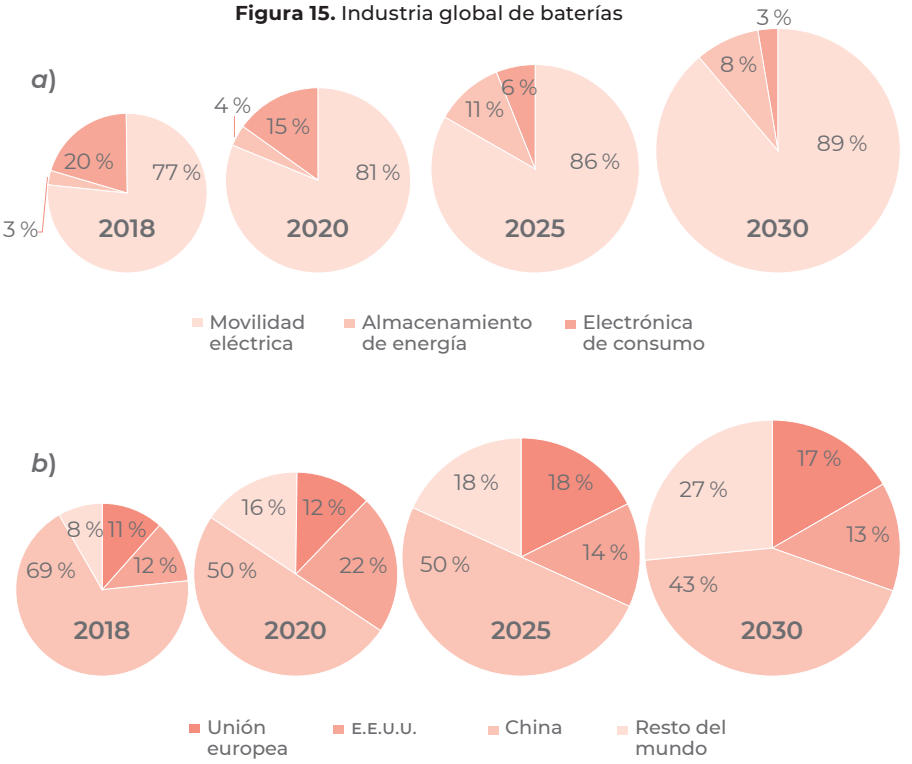


Fuente: adaptado de Ding y colaboradores (2019).

Las políticas gubernamentales —como en el caso de México— han abogado por el desarrollo de baterías para VE; esto estimulará aún más el progreso en el desarrollo de materiales para baterías, técnicas de escalamiento, estrategias de análisis a nivel fundamental, metodologías para análisis a nivel prototipo, sistemas de control, electrónica de potencia e informática vehicular hacia la movilidad inteligente (Liu et al., 2022).

El mercado del litio —elemento considerado crítico por los países que lideran la electromovilidad— es uno de los más dinámicos. En 2015 la demanda de litio para baterías representaba 35 %, mientras que, en 2019 se elevó al 57 %, y se espera que para 2030 corresponda al 90 % de toda la demanda, lo cual esto ha generado que el costo de los paquetes de baterías se reduzca, ya que cada vez existen más modelos de vehículos híbridos y puramente eléctricos; además, la mayor parte de las automotrices han lanzado nuevos modelos o han hecho planes de reconversión de su producción (CEPAL, 2023).

Figura 15. Industria global de baterías

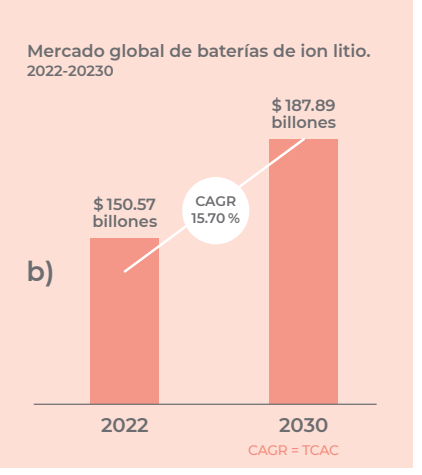


Nota: *a*) Demandas por aplicación. *b*) Demandas por región.
Fuente: adaptado de Liu y colaboradores (2022).

El crecimiento de este mercado es impulsado por las excepcionales características de las BIL: larga vida útil, reducción en los precios, creciente adopción de electrónica de consumo y aumento a la inversión en investigación y desarrollo para fabricar productos innovadores. Asimismo, el mercado de las baterías se ha transformado en las dos últimas décadas, impulsado por el rápido crecimiento del mercado de los VE y la demanda de baterías cada vez más potentes (Bernhart, 2023), así como por la creciente necesidad de automatización, equipos de manejo de materiales que funcionan con baterías en las industrias, el impulso de la demanda de dispositivos inteligentes y otros bienes industriales (Verified Market Research, 2023).

El valor del mercado mundial de baterías de litio fluctuó en 2022 (figura 16): de acuerdo con las fuentes citadas el valor se estableció entre los 44.5 hasta los 50 700 millones de dólares y se proyecta que crezca a más de 130 000 millones en 2030 a una tasa de crecimiento anual compuesto de entre el 13.10 hasta el 22.1 % durante el periodo de pronóstico 2023-2030 (Fortune Business Insights, 2023).

Figura 16. Proyección de crecimiento del mercado global de baterías en el periodo 2022-2030

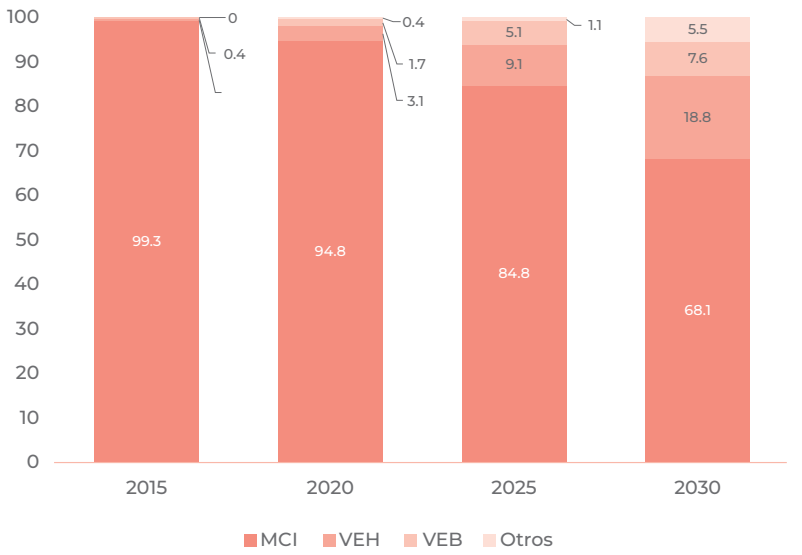


Fuente: adaptado de Fortune Business Insights (2023) y Verified Market Research (2023).

El desarrollo de baterías para el sector automotriz es estratégico, si se considera que México se encuentra entre los primeros productores —ensambladores— de automóviles. En la actualidad, el mercado sigue dominado por los vehículos con motor de combustión clásico, pero esto se reducirá del 99% en 2015 al 68% en 2030. El mercado de los VE —de baterías e híbridos— tendrá que multiplicarse por seis, lo que significa que será necesaria una enorme inversión en la fabricación de baterías para hacer frente a este aumento (Fortune Business Insights, 2023).

Aunque en el futuro cercano el sector de automóviles de combustión interna continuará siendo importante, se proyecta que para 2030 alrededor del 32% del total de automóviles serán eléctricos: híbridos, de batería o enchufables de batería (Berckmans et al., 2017). Esta proyección se muestra en la figura 17.

Figura 17. Evolución de la división tecnológica entre vehículos



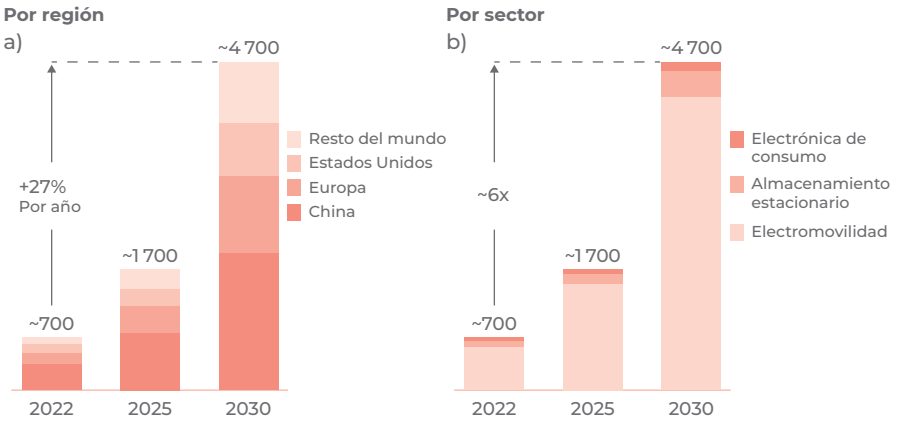
Nota: Vehículos eléctricos de baterías (VEB), vehículos eléctricos híbridos (VEH) y motores de combustión interna (MCI).
Fuente: adaptado de Berckmans y colaboradores (2017).

En este contexto, se prevé que la demanda mundial de BIL detone un aumento de energía disponible, pasando de 700 GWh en 2022 a 4.7 TWh en 2030 (figura 18). Las baterías para aplicaciones de movilidad representarán la mayor parte de la demanda en 2030 –4300 GWh–. Esto se debe en gran medida a tres factores de acuerdo con Fleischmann et al., (2023):

1. Un cambio normativo hacia la sostenibilidad, que incluye nuevos objetivos y directrices de cero emisiones netas, como el programa europeo "Fit for 55", la Ley de Reducción de la Inflación de los Estados Unidos, la prohibición en 2035 de los vehículos con motor de combustión interna en la Unión Europea y el plan de adopción y fabricación más rápida de vehículos híbridos y eléctricos de la India.
2. Mayores índices de adopción por parte de los clientes y aumento de la demanda de tecnologías más ecológicas por parte de los consumidores. Se prevé que hasta el 90% de las ventas totales de transporte de pasajeros corresponderá a VE en determinados países en 2030.
3. Anuncios sobre prohibir los vehículos con motores de combustión interna y alcanzar nuevos objetivos de reducción de emisiones.

Otro de los factores trascendentales en la determinación de los cambios que pueden ocurrir en el mercado de BIL es la cantidad de nuevas fábricas de baterías que se están desarrollando a nivel mundial. A la fecha, la mayoría de dichas fábricas están concentradas en Asia, con China dominando más del 50% de la producción. Esta tendencia experimentará un cambio en los próximos años, ya que en todo el mundo se están instalando nuevas fábricas de baterías, y las ya instaladas están expandiendo su capacidad de producción. Por otro lado, se espera que existan nuevos mecanismos de apertura de mercado, como el segundo uso de baterías de movilidad a baterías de almacenamiento renovable que pueda ayudar a disminuir la demanda por nuevas reservas. El reciclaje de las baterías es otra alternativa que permitiría establecer una puerta de entrada a la cadena de valor de litio.

Figura 18. Demanda y crecimiento esperado de baterías de litio con base en la potencia eléctrica en GWh



Nota: *a*) Por región. *b*) Por sector. Incluye autos de pasajeros, vehículos comerciales, vehículos de dos y tres ruedas y vehículos todoterreno.
Fuente: adaptado de Fleischmann y colaboradores (2023).

Ante estas consideraciones y el crecimiento del mercado mundial de BIL, México debe analizar la posibilidad de integrarse en la producción de baterías, con el objetivo de fortalecer la economía nacional y atender el mercado interno. Este análisis debe incluir no sólo costos de producción , sino también los impactos ambientales y sociales generados en la extracción, producción de compuestos y fabricación de BIL.

Mercado de reciclaje de baterías de litio

El reciclaje es el proceso por el que se aprovechan los residuos sólidos, que aún tienen valor económico, para reintroducirse directa o indirectamente en la cadena productiva de donde fueron usados o en alguna otra cadena (Profepa, 2022). La creciente demanda de baterías de litio y el rezago en la oferta del mineral ha incentivado el aprovechamiento, uso, reúso y reciclaje de baterías consideradas de desecho. El reciclaje de los materiales

y el reúso de las baterías son considerados como una alternativa al problema de la brecha de mercado. Actualmente, el porcentaje reciclado de baterías no rebasa el 5%.

A continuación, se enumeran algunas razones por las que es indispensable reciclar baterías de litio.

1. Adoptar el reciclaje trae ventajas ambientales, sociales y económicas, siempre y cuando el costo del reciclaje sea menor al costo productivo con materia prima de primera línea.
2. Asegurar el abasto al aumentar los recursos aparentes, reinyectando materia prima de reúso.
3. Reducir emisiones de CO_2 en la cadena productiva, sobre todo en la extracción del material crítico, pero también en el transporte de materiales y productos.
4. Disminuir el acaparamiento del material crítico a través del reciclaje, mejorando la distribución del material recuperable.
5. Cumplir con los compromisos ambientales internacionales en materia de regulación del manejo de desechos especiales asociados al tratamiento y desecho de las baterías de litio usadas, así como con el compromiso en la reducción de emisiones de CO_2.
6. De cumplirse el supuesto de que el reciclaje es económicamente más conveniente que la extracción del material virgen, se podrían tener precios más atractivos en la producción de las BIL y, por lo tanto, en el producto final.
7. Ofrecer un producto con sello verde o alguno otro certificado ecológico, por ejemplo, de bajas emisiones desde la producción hasta el consumo, que atraerá el interés de los consumidores conscientes con el medio ambiente.
8. Reducir los costos de la batería ($/kWh), incrementando la eficiencia en su producción, en los últimos años el costo en la producción de baterías ha disminuido el 14% anualmente, de 2014 a 2019.

9. Mantener la estabilidad en los precios de las baterías en el mercado, al reducir la brecha entre la oferta y la demanda.
10. Reducir costos de investigación en procesos extractivos de las materias vírgenes mediante minería convencional.

El reciclaje de las BIL es una estrategia que promete un manejo sostenible económica y ambientalmente. Esto ayuda a contrarrestar la brecha entre la oferta y la demanda en los mercados de materia virgen, mantiene la sostenibilidad de la producción de baterías y controla los precios.

Sin embargo, su implementación no es sencilla, se requiere de voluntad política y coordinación interestatal para lograr la recuperación, el manejo, el transporte y el tratamiento de las baterías. Éstas deberán manejarse de manera unificada en el país responsable del tratamiento para disminuir los costos económicos y las emisiones generadas en la cadena de transporte.

Desafortunadamente el reciclaje es un proceso costoso, por lo que el incentivo económico debe ser grande para que la industria automotriz o los inversionistas públicos y privados decidan apostar por este camino. Un caso de éxito y punta de lanza en el tema del reciclaje es China, quien ha logrado ponerse al frente de la tecnología del reciclaje.

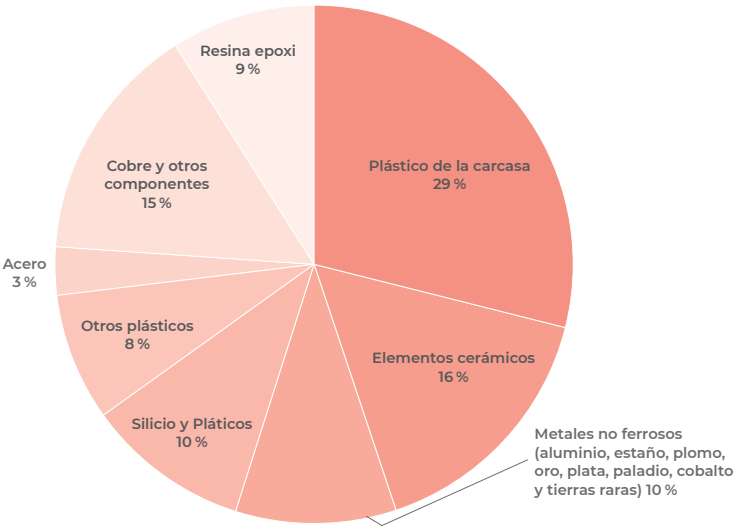
Aunado a los costos antes señalados, es necesario incorporar en la ecuación del reciclaje de BIL el costo del transporte de las baterías desechadas y sus costos de retorno, que no son incluidos en los modelos de factibilidad (Li et al., 2018).

Las empresas productoras de baterías podrían no tener suficientes incentivos económicos al reciclaje, sin embargo, si la escasez de la materia prima no se soluciona en los próximos siete años –tiempo en que se encuentran comprometidos los contratos de largo plazo– los precios del litio irán al alza, entonces, valdría la pena comenzar a invertir en nuevas tecnologías que minimicen costos productivos (Gavi, 2020).

El mismo informe asegura que el problema de los costos del reciclaje encuentra salida al reducir en dos tercios los precios actuales del proceso para que la industria automotriz se interese en adoptar el reciclaje; es el reto económico al que deben enfrentarse en estos años. Por otro lado, también se puede implementar un programa de incentivos no económicos con regulaciones estrictas que obligan a las empresas a reciclar las BIL producidas, pese al adelgazamiento de sus márgenes de ganancia, así se apresurará el paso para minimizar costos de producción.

Cabe destacar que en las baterías y residuos electrónicos existe potencial de reciclar casi todos sus materiales; hay estudios que aseguran que se pueden encontrar hasta 60 elementos de la tabla periódica en una sola batería; algunos de los metales recuperables y con valor de mercado son: aluminio, cobre, acero, estaño, plomo, oro, plata y paladio, entre otros componentes (World Economic Forum, & Platfotm for Accelerating the Circular Economy, 2019) (figura 19).

Figura 19. Componentes reciclables de baterías de residuos electrónicos



Fuente: World Economic Forum, & Platfotm for Accelerating the Circular Economy.

En 2018 la ONU estimó que en el mundo se desecharon 50 millones de toneladas de residuos electrónicos, 62500 mil millones de dólares, lo que equivale en volumen a 4500 mil torres Eiffel, 125000 jets jumbo o el tamaño de Manhattan. Según el World Economic Forum (2019) hay 100 veces más oro en una tonelada de teléfonos inteligentes que en una tonelada de extracción de roca mineralizada de la que se extrae oro de manera tradicional. La cantidad recuperable y el precio de los materiales abren un nicho de oportunidad en el reciclaje de las baterías que vale la pena explorar.

Se estima que con el reciclaje en circuito cerrado se podría ahorrar hasta el 50% del recurso virgen; minería, materiales de cátodo, producción precursora y de cátodos, además del transporte. Aunado a ello, se cree que se podrían generar ahorros hasta por el 70% en el consumo de energía y en la reducción de emisiones de CO_2 (World Economic Forum, 2019).

La adopción del reciclaje en la cadena de valor dependerá de la calidad del material reciclado, lo anterior porque los costos del procesamiento del litio son altos. En la tabla 4 se observa cómo el porcentaje de los costos pasa del 53% al 66% en la construcción de celdas y el procesamiento de la batería con material reciclado, considerando que las actividades se procesan en diferentes plantas de producción.

Los materiales catódicos son costosos, pueden representar hasta el 55% del total del costo de producción de la batería, concentrados en las tres materias primas esenciales: litio, níquel y cobalto. Además, la sustitución de materias primas en la construcción de las BIL podría traer cambios en el importe total y en la demanda de metales, avances tecnológicos reflejados en la eficiencia de la fabricación, el reúso y reciclaje (tabla 3).

El reciclaje podría ser una alternativa a la extracción siempre y cuando la suma de los costos por el proceso de reciclaje sea inferior al precio que presentan en el mercado los materiales vírgenes para la producción de baterías. En otras palabras, la transacción del mercado se realizará sólo cuando el precio de las materias primas sea igual o mayor al precio económicamente viable de los materiales reciclados.

Tabla 3. Porcentaje de los costos y precio en la producción de baterías de Li recicladas y con material virgen

ESLABONES DE LA CADENA DE VALOR	CON MATERIA PRIMA VIRGEN		CON MATERIAL RECICLADO	
	% DE COSTOS EN LA PRODUCCIÓN	PRECIO (DÓLARES $)	% DE COSTOS EN LA PRODUCCIÓN	PRECIO (DÓLARES $)
Materia prima	12%	50	0%	0
Procesamiento de materiales	28%	118	25%	104
Electrodos	7%	28	8%	33.28
Construcción de celdas	35%	146	44%	183.04
Procesamiento de la batería	18%	74	22%	91.52
Total	100%	416	100%	412

Fuente: estimación propia con base en Mayyas et al., 2019.

Generar incentivos económicos y aplicar políticas públicas adecuadas pueden incidir en el comportamiento de los agentes económicos; por ejemplo *1*) internalizar las externalidades negativas del proceso de extracción y *2*) normar el uso y producción de las BIL para que se diseñen pensando en el reciclaje.

Apostar por la inversión en tecnología y el desarrollo de la ciencia (I+D) es una estrategia ya probada por las empresas productoras de baterías que se refleja en la disminución de los costos de producción debido a la reducción del contenido de cobalto, la adopción de nuevas tecnologías o nuevos materiales en la construcción de las BIL, todo ello ha logrado reducir el costo total de la batería. Por lo tanto, trasladan ese beneficio de los costos en reducción de los precios que incentiva al usuario final, (Harper, 2019; Dunn, 2015; IEA, 2020 y Gaines, 2014).

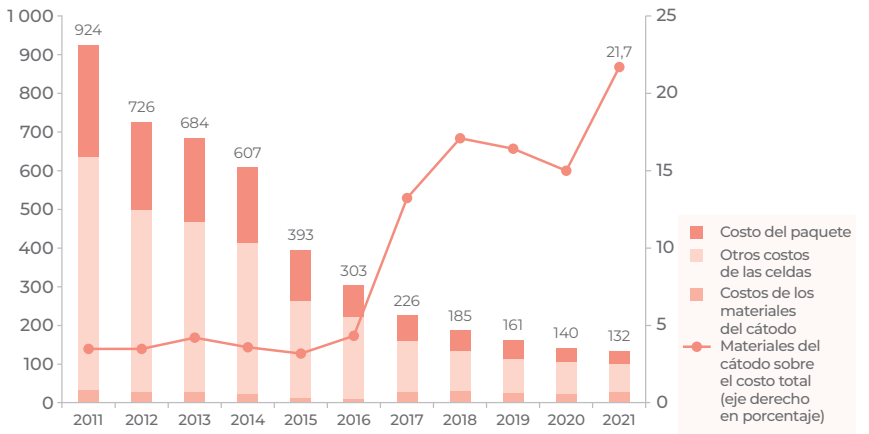
Según CEPAL, existe una caída continua de los costos de producción de las BIL de 2011 a 2021, en promedio el 14% anual. Es una señal para quienes deseen incursionar en los mercados del reciclaje del litio. En la figura 20 también se observa cómo los materiales catódicos de las baterías de iones de litio

(se combina litio, níquel, cobalto y manganeso en distintas proporciones) representaban menos del 5% de los costos de los paquetes de baterías en 2010. Con el aumento del precio del litio y otros metales para baterías registrado a principios de 2022, ahora se acerca al 20% (CEPAL, 2023b).

Empresas recicladoras de baterías de litio

El mercado del reciclaje de litio se encuentra conformado por dos regiones: Europa y Asia, en las que Eslovenia, Corea del Sur, Alemania, Austria y Letonia reciclan el 56.8%, 56.5%, 46.3%, 40.6% y el 34% respectivamente de sus residuos (OECD, 2023). Aproximadamente el 80% del reciclaje baterías de litio se realiza entre Europa y Asia, China, Corea del Sur y Japón.

Figura 20. Evolución del costo de las baterías de iones de litio y participación de las partes sobre el costo total, 2011-2021 (dólares /kwh y porcentajes)



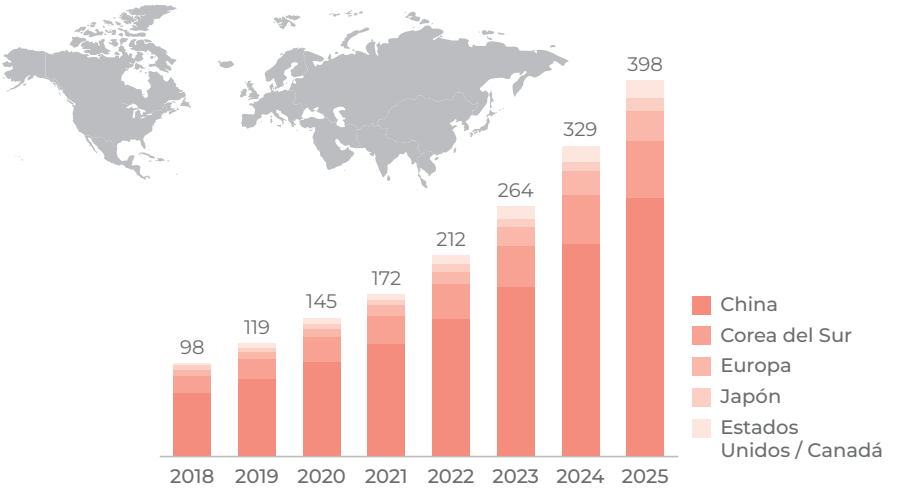
Fuente: CEPAL, 2023b.

Para los Estados Unidos el proceso ha sido diferente, ya que ha llegado al mercado después de la distribución y no ha logrado contrarrestar el poder de mercado de los países asiáticos, quizás está más cerca de los

mercados europeos. Las inversiones en Norteamérica aún no son suficientes para hacerle frente a la actual distribución del mercado mundial de baterías de litio (figura 21).

En Norteamérica, el reciclaje de litio había sido insignificante hasta 1992, cuando en Canadá se comenzó a reciclar baterías de litio metálico y de iones de litio y en el 2015 se abrió la primera empresa de reciclaje de baterías en los Estados Unidos. A partir de la creciente demanda del material, las empresas de automóviles y recicladoras de baterías se asociaron para asegurar la cantidad requerida en la construcción de automóviles eléctricos (U.S. Geological Survey, 2023).

Figura 21. Baterías de litio enviadas a reciclar (tonelada)

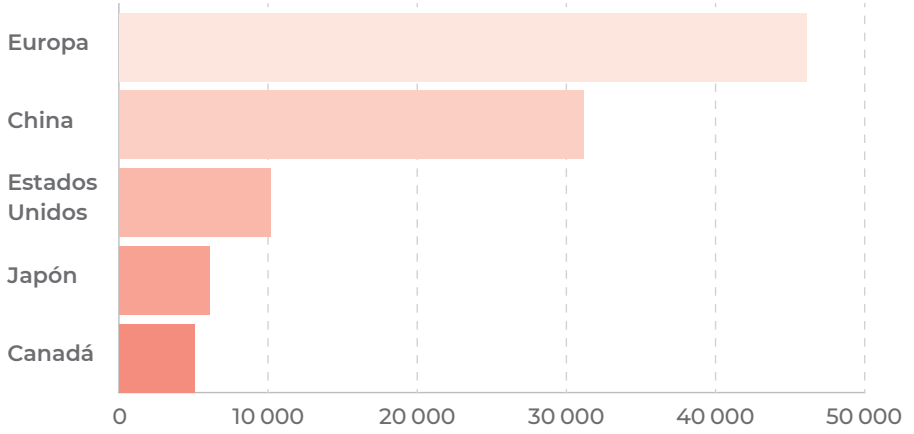


Fuente: adaptado de Benchmark, 2020.

En 2016 se desecharon en el mundo 435 000 toneladas de teléfonos celulares con un valor en materiales reciclables aproximado de 9.4 billones de euros. Se estima que anualmente 180 000 toneladas de baterías de celulares, tabletas y computadoras portátiles llegan al final de su vida útil, de los cuales sólo se recicla el 54 % (United Nations, 2017).

En 2018, la capacidad mundial de reciclaje de baterías gastadas superó en el mundo las 98 000 toneladas, la mayoría de ellas eran baterías de iones de litio. Los países europeos constituyen cerca de la mitad de estas capacidades, mientras que China representa casi un tercio. Los Estados Unidos participan con el 10 % y Canadá y Japón tienen alrededor del 6 % (figura 22).

Figura 22. Capacidad de reciclaje de baterías usadas, 2018 (toneladas/métricas)



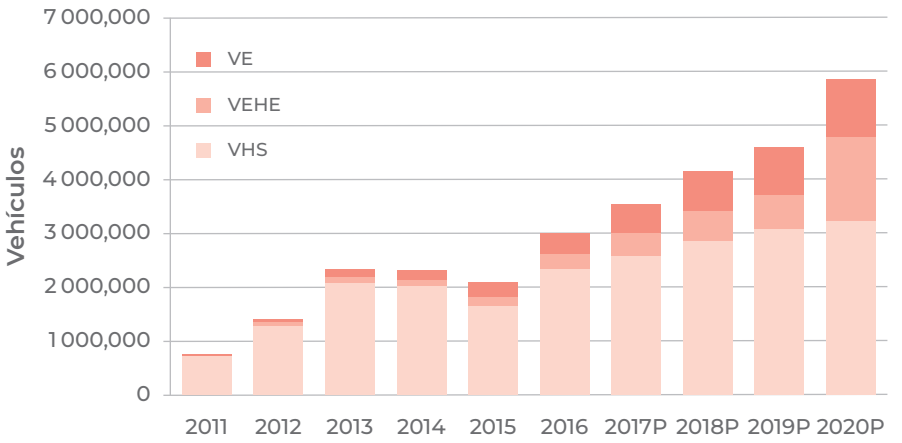
Fuente: adaptado de ICCT, 2020.

Mercado de autos eléctricos

En 2020 la demanda de vehículos eléctricos con batería (BEV) alcanzó su nivel máximo, las ventas fueron seis veces mayores en comparación con las del 2011. Esto produjo una creciente demanda de minerales críticos para la fabricación de baterías de nueva gama, cuya demanda continúa incrementando (figura 23). En 2022 el mercado internacional de autos colocó alrededor de 80 millones de unidades, de ellas se vendieron 7.8 millones de BEV, es decir, uno de cada diez autos vendidos a nivel

mundial en 2022, es un auto eléctrico, según LMC Automotive y EV-Volumes (2023).

Figura 23. Venta de vehículos eléctricos por tipo de batería



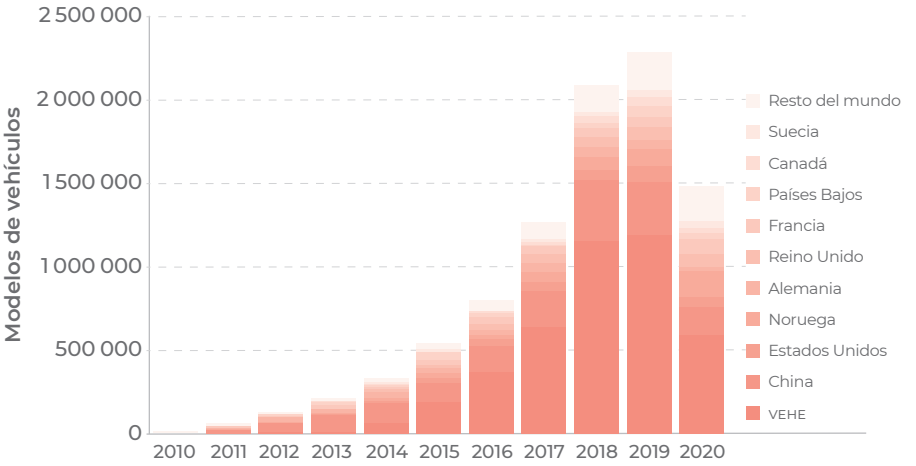
Nota: VE: vehículos eléctricos, VEHE: vehículos eléctricos híbridos enchufables, VHS vehículos híbridos suaves.
Fuente: adaptado de Mayyas et al., 2019.

Las ventas de autos eléctricos, desfragmentadas por los mercados internacionales, permiten analizar el poder de mercado entre ellos. El caso más interesante es el repunte de China, que en pocos años ha logrado producir, vender y liderar el mercado de los autos eléctricos en el mundo. Uno de cada dos autos eléctricos colocados en el mercado internacional es de origen chino. En promedio, los autos eléctricos de este país son un 50% más baratos que sus homólogos europeos y estadounidenses (IEA, 2020).

De 2014 a 2020 las ventas de autos eléctricos en el mundo han tenido cambios en la distribución de la oferta. El mercado chino ha crecido exponencialmente, según los datos reportados por The International Council

on Clean Transportation (ICCT, 2021). En 2019, en el mundo se vendieron más de un millón de autos eléctricos, dentro de los cuales, los Estados Unidos han trabajado por hacerse de un lugar en las ventas totales, alcanzando aproximadamente un tercio de las ventas de China, mientras que los mercados europeos han perdido poder de mercado ante los mercados asiáticos (figura 24).

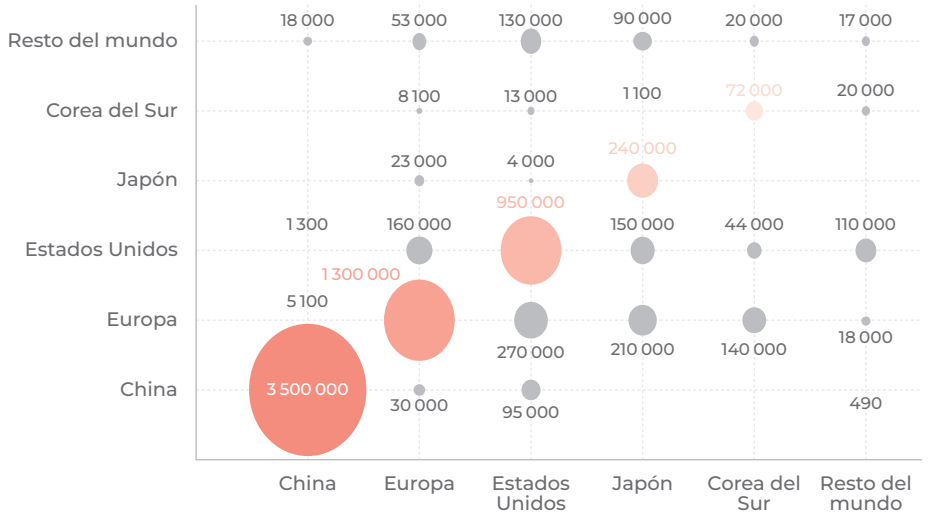
Figura 24. Ventas globales de vehículos eléctricos de pasajeros por mercado, 2010-2020



Fuente: adaptado de ICCT, 2021.

En 2020 nueve países disputaron el mercado mundial de autos eléctricos de pasajeros (figura 25). En un periodo corto, China ha inundado el mercado mundial de producción de vehículos eléctricos, seguido de los países europeos (Noruega, Alemania, Reino Unido, Francia, Países Bajos y Suecia) y de los Estados Unidos, junto con otros países asiáticos (Japón y Corea del Sur). La producción de vehículos eléctricos en China fue 3.5 veces mayor a la estadounidense, 2.5 que la producción europea y 11 veces más grande a la producción asiática.

Figura 25. Principales productores de vehículos eléctricos por región, 2020

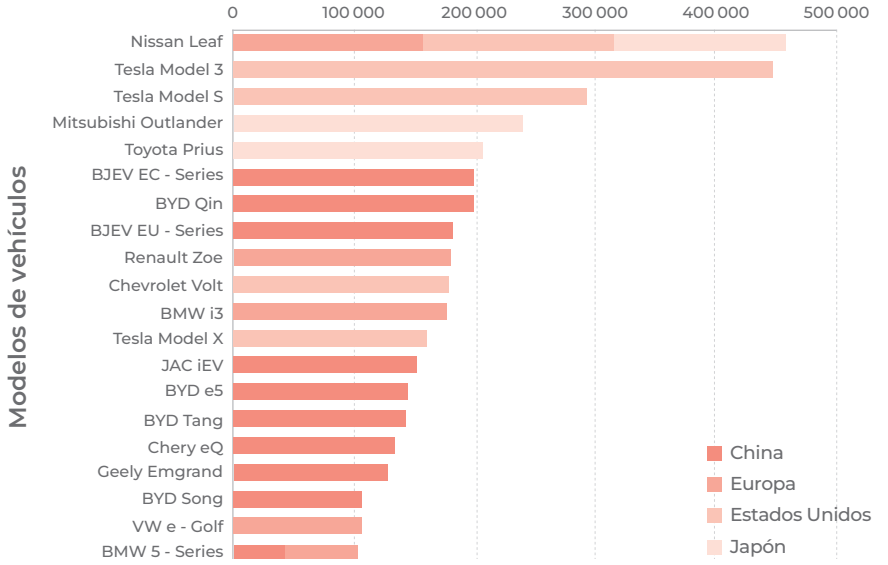


Fuente: adaptado de ICCT, 2021.

Del 2019 al 2020, la distribución del mercado de autos eléctricos, clasificado por modelo, se mercantiliza de la siguiente manera:

1. China ofrece nueve de los veinte modelos más vendidos, con ventas medias entre 100 000 y 200 000 mil vehículos.
2. Europa ofrece tres marcas propias y dos marcas compartidas, una con China y otra con Japón y los Estados Unidos.
3. Los Estados Unidos ofrecen tres modelos de la marca líder en su país, dos de los cuales son de los más vendidos en el mercado, entre 300 000 y 400 000 unidades, y el otro de una marca emblemática; además de un modelo compartido con Japón y Europa.
4. Japón ofrece dos marcas muy conocidas en el mercado internacional, entre ambas producen aproximadamente 200 000 autos (figura 26).

Figura 26. Principales modelos de vehículos eléctricos vendidos, 2019-2020



Fuente: adaptado de ICCT, 2021.

CASO DE ESTUDIO: MÉXICO

EL MERCADO DE ELECTROMOVILIDAD

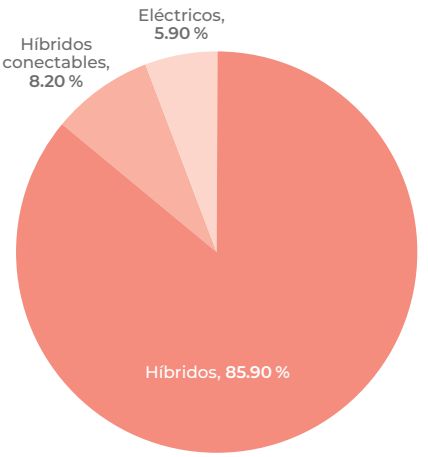
El Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) señala que, al final de 2021, las fuentes móviles de transporte fueron la principal causa de emisiones, con un total de 148 000 Gg de CO_{2e} (1 Gg = 109 gramos), es decir, el 21% de las emisiones totales a nivel nacional. De éstas, el autotransporte (autos particulares, motocicletas, camiones de carga, repartidores, camiones de pasajeros y transporte público) generó el 19.5% del total de las emisiones de GEI en 2021 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2023).

El Programa Nacional Estratégico (Pronace) de Energía y Cambio Climático considera a la movilidad sustentable como una estrategia de política pública que tiene por objetivo disminuir la dependencia del transporte de la energía fósil. La propuesta es minimizar la necesidad de transporte en las urbes, generar la menor movilidad automotora, posibilitar el teletrabajo, el consumo local y la movilidad ciclista, entre otras medidas. Este programa también impulsa la investigación en temas de movilidad sustentable, como la electrificación del parque vehicular, particularmente de transporte público y colectivo como una de las medidas para mitigar emisiones contaminantes y generalizar el beneficio social.

En los últimos años las ventas de autos de la gama de electromovilidad en México han venido creciendo de manera importante en sus tres categorías: *1*) eléctrico, *2*) híbrido o *3*) híbrido conectable, aunque su penetración en el total del parque vehicular es baja. En 2020, la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA) reporta que el 2.6% de las ventas del parque vehicular fueron autos de la gama eléctrico-híbrido, esto es 24 700 mil autos; en 2021 el consumidor demandó 46 600 mil autos eléctricos. Para 2022, de cada 100 autos vendidos en México, cinco fueron eléctricos-híbridos, 51 400 unidades, distribuidas como sigue: los autos híbridos dominan los mercados con una participación del 86%, a diferencia de los autos híbridos conectables que tienen el 8% de cuota en las ventas sustentables mientras que los autos eléctricos tienen aún una baja participación en las ventas, con sólo un 6% (figura 27 y figura 28).

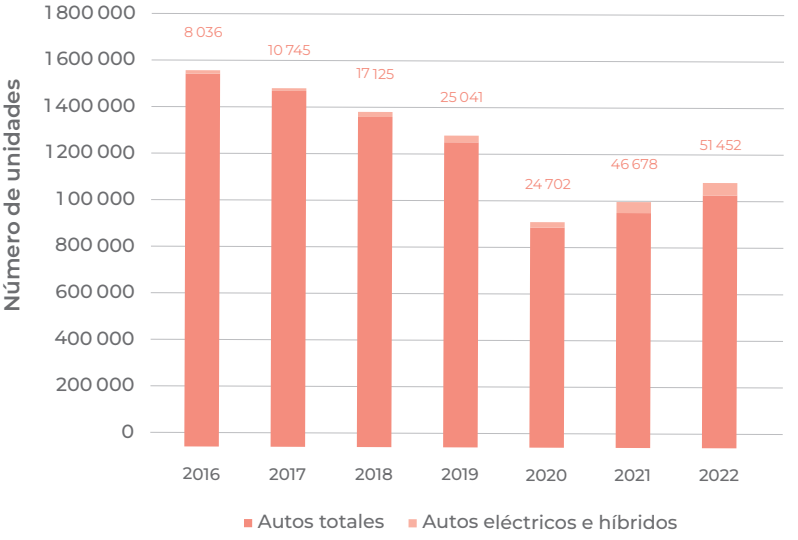
Si bien las ventas de autos eléctricos están creciendo, aún son pequeñas en comparación a las ventas de autos convencionales. El precio de los VE aún es poco competitivo para el mercado de autos e inasequible para la mayoría de la población; además, la adquisición de estos autos supone la pertenencia de un estacionamiento propio en la que puedan cargar la batería.

Figura 27. Autos híbridos y eléctricos vendidos en México, 2022



Fuente: elaboración propia con base en AMIA, 2023.

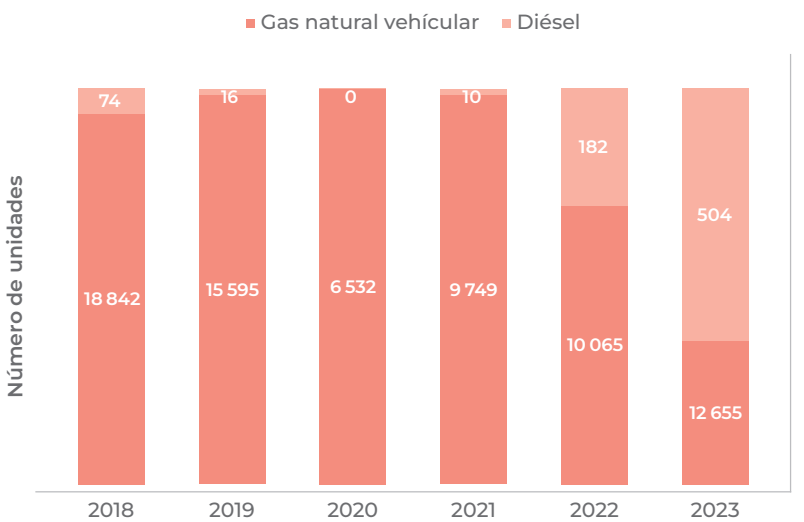
Figura 28. Venta de autos de la gama eléctrico-híbridos, 2016-2022



Fuente: elaboración propia con base en AMIA, 2023.

En 2022, la Asociación Nacional de Productores de Autobuses, Camiones y Tractocamiones (ANPACT) reporta la venta de 13 000 unidades destinadas al transporte público, lo que representa un 30 % menos unidades que en 2018, distribuidas de la siguiente manera: 96 % de diésel y 4 % de gas natural. Por el momento, las ventas de autobuses nuevos sólo son de motores que funcionan con hidrocarburos, no obstante, en los próximos años se pretende producir los primeros autobuses eléctricos. Para el caso de México, ya existen pruebas piloto para autobuses de transporte público impulsados por energía eléctrica, a través de una reconversión de motor diésel a eléctrico (figura 29).

Figura 29. Venta de autobuses de transporte público en México, 2018- 2022

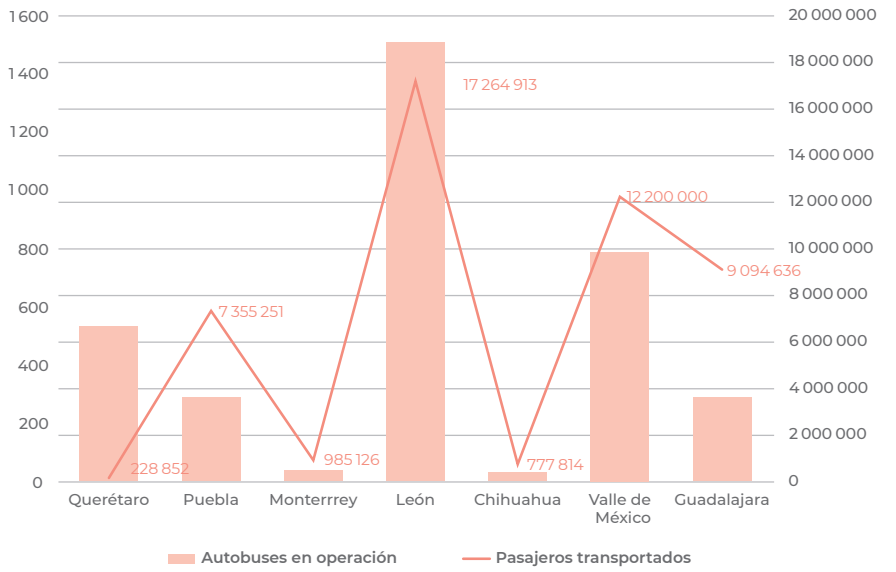


Fuente: elaboración propia con base en Inegi, 2023.

Se espera que la reconversión pueda beneficiar a millones de usuarios del transporte público en las ciudades más grandes del país; sólo en la ciudad de León, Guadalajara y el Valle de México beneficiará a 46

millones de pasajeros. Cuando se alcance la reconversión de los 3 600 autobuses de motor diésel a eléctrico en las siete ciudades más grandes del país (Valle de México, León, Monterey, Querétaro, Puebla, Guadalajara y Chihuahua), se beneficiará a 57 millones de usuarios del transporte público en las ciudades antes citadas (AMIA, 2020 e Inegi, 2020) (figura 30).

Figura 30. Pasajeros y autobuses de transporte público en siete ciudades, 2022

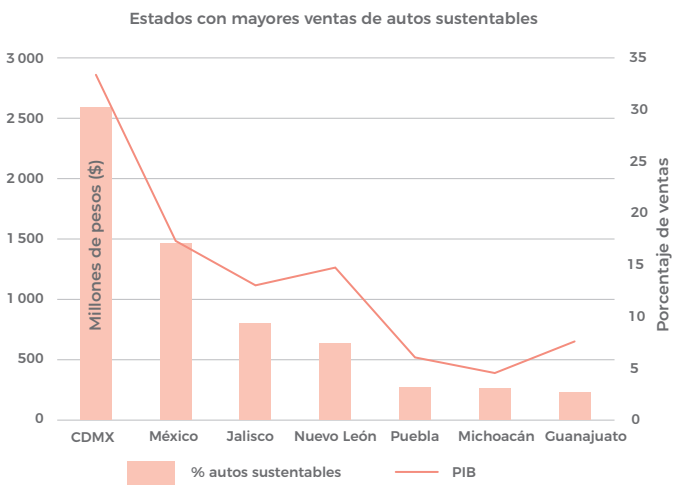


Fuente: elaboración propia con base en AMIA e Inegi, 2020.

La distribución de las ventas se concentra en los cinco estados con mayor Producto Interno Bruto (PIB), excepto Puebla, que aparece en el número once de la lista de ingresos: Ciudad de México, Estado de México, Nuevo León, Jalisco y Puebla. Las ventas de estos cinco estados suman el 61 % de las totales ventas de autos sustentables del país (figura 31).

Algunos de los retos que debe enfrentar el país para lograr la transición energética, es contar con la infraestructura necesaria para hacer posible la recarga de las baterías de los autos y autobuses eléctricos. Para ello, será necesario aumentar el desarrollo de la infraestructura de recarga de los automotores eléctricos a través de *electrolineras* para autos privados y para autos de transporte público. Éstas, a su vez, deberán ir creciendo acorde al desarrollo del mercado tanto de autos particulares como de autobuses de transporte público, lo que lleva consigo: *1*) aumentar la capacidad de la red eléctrica debido a la creciente demanda de energía, *2*) creación de nuevas vías de comunicación que incluya a las electrolineras, y *3*) facilitar la instalación de cargadores en numerosos puntos del país, ya que por el momento sólo se cuenta con 1 146 estaciones de carga en México (AMIA, 2023) (figura 32). Ahora, las electrolineras se encuentran concentradas en las ciudades con mayores ventas de autos eléctricos del país, lo que deberá cambiar al incrementar el parque vehicular eléctrico e introducir la política de electromovilidad en el transporte público.

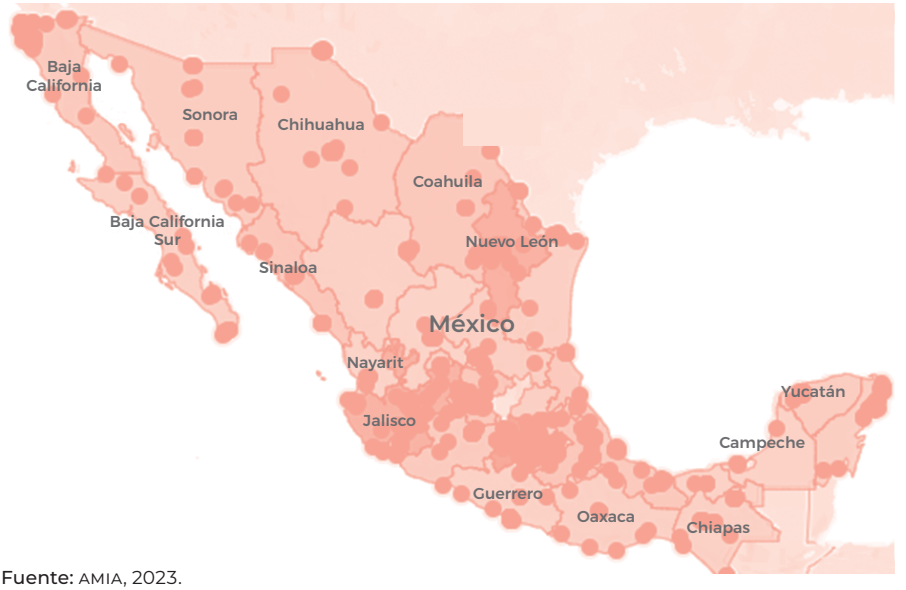
Figura 31. Estados con mayores ventas de autos sustentables (%) vs. PIB (millones de pesos), 2020



Fuente: elaboración propia con base en AMIA e Inegi, 2020.

Otra consideración importante en la toma de decisiones para la inversión en electrolineras es el tiempo de recarga de las baterías de los autos eléctricos, éste depende del tipo de voltaje que se ofrece. La carga lenta puede llevar 24 horas y la rápida podría tardar entre treinta minutos y una hora (cambioenergético, 2023), tiempo superior al invertido en la carga de combustible convencional. El transporte público tiene la ventaja de contar con una demanda de estaciones de carga menor en comparación con la inversión privada. Por su naturaleza, la conexión se puede hacer en puntos fijos, como centros de almacenamiento de autobuses o paraderos, y con tiempos y horarios planificados.

Figura 32. Electrolineras para la recarga de baterías de autos eléctricos, 2022



Fuente: AMIA, 2023.

Para incrementar la infraestructura de las electrolineras se requerirá la entrada de inversión privada que abastezca lo necesario para hacer crecer su oferta; por otra parte, se deberá apoyar a la Comisión Federal de

Electricidad (CFE) para cubrir el exceso en la demanda de energía futura, sobre todo, se deben revisar los horarios pico y establecer una estrategia que responda al aumento de la generación considerando la actual demanda doméstica e industrial.

Es necesario aprender de los actuales problemas en los que se encuentra el estado de California, Estados Unidos, en donde se estima para 2040 un aumento en la demanda de la energía eléctrica del doble de lo consumido actualmente (San Diego Gas y Electric Company, 2022) lo que requiere una búsqueda inmediata de alternativas de generación limpia.

Además, será indispensable cuantificar los ingresos que dejará de percibir Petróleos Mexicanos (PEMEX) por la disminución en la venta de petrolíferos y evaluar los ingresos recibidos por la recarga de las baterías de los autos eléctricos.

ESTUDIO DE RECICLAJE DE RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL (RME) Y DE BATERÍAS EN MÉXICO

El reciclaje en México es un mercado poco estudiado, sin embargo, es un nicho de oportunidad para hacerse de recursos estratégicos a través de materiales desechados que aún pueden valorizarse por medio de algún tratamiento y convertirse en ingreso que beneficie económica y ambientalmente a la sociedad. Para ello, habrá que mejorar los niveles de reciclaje del país, procurando emular el promedio que manejan los países que conforman la OCDE.

Los RME son definidos por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), como aquellos generados en procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos. Entre los RME encontramos residuos de la construcción y rocas, residuos de servicios de salud, residuos de actividades pesqueras, residuos del servicio de transporte, lodos de tratamiento de aguas residuales, residuos de tiendas grandes y residuos tecnológicos o de vehículos automotores.

Los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) definidos como los residuos tecnológicos provenientes de industrias de la informática y de los fabricantes de productos electrónicos que, al transcurrir su vida útil, requieren de un manejo especifico y son considerados de manejo especial (art. 19, sección VIII, LGPGIR).

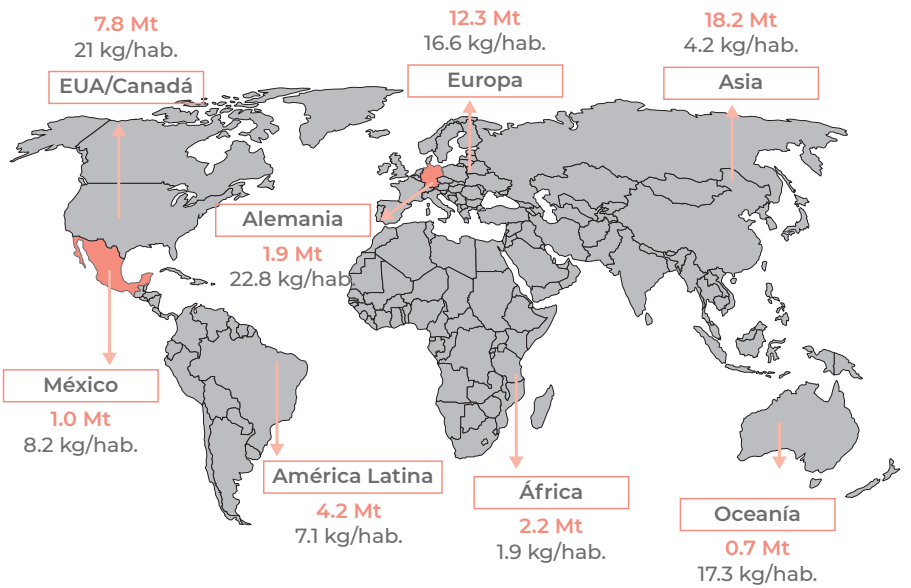
Existen pocos estudios de residuos electrónicos, según la Agencia Alemana de Cooperación para el Desarrollo Sustentable (GIZ, por sus siglas en alemán) México es el segundo generador, en términos absolutos, de residuos electrónicos en América, aunque en términos *per cápita* se genera menos de la mitad de los residuos que en los Estados Unidos y Canadá. La generación de RAEE en el país, en términos relativos *per cápita*, es mayor que la generación de Asia, África y Latinoamérica, pero menor que la generación de Alemania, los Estados Unidos, Canadá, Oceanía y Europa. En 2015 se produjeron en México 1.1 millones de toneladas de residuos electrónicos, esto es 8.2 kilogramos de RAEE por habitante (figura 33). Se estima que en 2026 se generarán 1.4 millones de toneladas de RAEE (Semarnat, 2017).

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) la generación de RAEE para 2021 es de 1.2 millones de toneladas, de ellos, aproximadamente el 65% tiene potencial económico, de los cuales el 6% debe ser separado y manejado como residuo peligroso y el 29% corresponde a materiales no aprovechables (cerámicas, fibras y plásticos no valorizables). Se estima que aproximadamente la mitad de los residuos generados termina enterrada en algún relleno sanitario o en algún tiradero clandestino. Por otro lado, también puede encontrar algún mercado informal que recolecte y exporte a algún mercado internacional de reciclaje.

Se tienen identificadas 153 empresas formales en México que se dedican al manejo integral de los residuos electrónicos, con una capacidad autorizada de 235 859 toneladas de residuos. Si para el mismo año se generaron 1.1 millones de toneladas, es claro que no existe la infraestructura para atender la cantidad de residuos electrónicos generados (GIZ, 2020).

Por otro lado, como se observa en la tabla 5, estas empresas no logran realizar todo el proceso de reciclaje, el 91 % de las empresas listadas sólo realiza acopio, transporte, almacenamiento y separación bruta de los residuos electrónicos. Según la Semarnat, entre los materiales desaprovechados se encuentran: metales (hierro, cobre, aluminio), metales preciosos (oro, plata, paladio) y plásticos (PP, ABS, PC, PS). A esta lista habrá que agregar el litio.

Figura 33. Generación de RAEE en México y el mundo, 2017



Fuente: GIZ, 2020.

La actividad más redituable en el proceso de reciclaje es la redefinición de los materiales valorizables y la eliminación de su toxicidad, los RAEE peligrosos son los que contienen mercurio, cadmio, cromo, vidrio de plomo, los químicos PBDE, PCB y sustancias agotadoras de la capa de ozono.

Actualmente ninguna empresa en México lleva a cabo el proceso de eliminación de la toxicidad de los RAEE. No existe la recuperación de materiales derivados de los residuos electrónicos, especialmente de metales preciosos, la recuperación de materiales y metales preciosos lo realizan industrias extranjeras. Esta actividad podría generar oportunidades de trabajo que beneficien el mercado interno de nuestra economía, además de la salida de los metales preciosos que evita la posibilidad de obtener materiales valorizables de reúso generados por el consumo del mercado interno en México, dejando ir la oportunidad para hacernos de recursos económicos de los desechos y de generar una empresa interna, con todos los beneficios que esto puede traer (tabla 4).

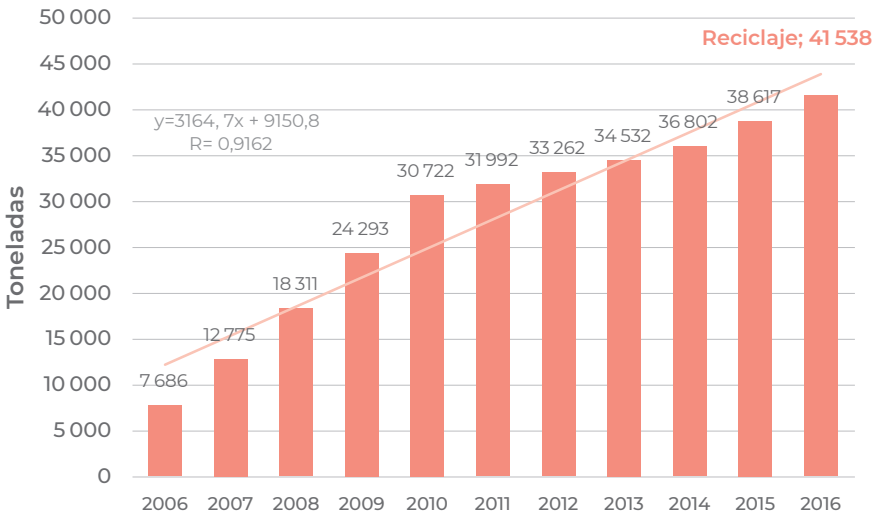
Tabla 4. Niveles del manejo integral de residuos electrónicos

%	NIVEL 0	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Empresas en el manejo integral de los residuos eléctrónicos	Logística de acopio, transporte y almacenamiento en planta y centros de acopio	Separación gruesa de residuos no electrónicos	Separación selectiva de componentes y materiales con potencial económico, disposición o tratamiento de materiales tóxicos y renovación o reparación de equipos electrónicos	Refinación de los materiales y eliminación de su toxicidad. En este nivel, las empresas toman las partes metálicas y las funden para volver a producir metal
	(+)60 %			(+++++)0 %
	(++)31 %			
			(+++)6 %	
	(++++)3 %			

Fuente: elaboración propia con base en GIZ, 2020.

El reciclaje de residuos electrónicos en México ha tenido un acelerado y constante crecimiento. En diez años, de 2006 a 2016, pasó de 7 600 a 41 500 mil toneladas recicladas, el equivalente al 10.8 % de los residuos electrónicos generados (Semarnat, 2017) (figura 34).

Figura 34. Reciclaje estimado de residuos electrónicos (toneladas/año)



Fuente: elaboración propia con base en Semarnat, 2018.

Por otro lado, en el tema de electromovilidad y baterías de litio se observa lo siguiente: en 2022, en México se vendieron 122 500 mil autos, 105 000 híbridos, 1 000 híbridos conectables y 7 000 eléctricos (Inegi, 2020); lo que significa que para el mercado de BIL, en el periodo de vida útil, estarán disponibles en el país para autos reconvertibles de segundo uso o para su reciclaje. En promedio, cada batería de VE puede contener hasta 10 kilogramos de litio, 15 kilogramos de cobalto y 20 kilogramos de manganeso, y según algunos estudios, se puede obtener el 70 % del metal recuperado (IEA, 2021).

Asumiendo el volumen de baterías recuperadas de la venta de 2022 y los datos de recuperación mencionados, se generarían alrededor de 857 000 kilogramos de litio, 1.2 millones de kg de cobalto y 1.7 millones de kg de manganeso. Sin embargo, existen casos de baterías, como la del modelo Tesla Model S, que contiene 62 kg de litio, lo que modificaría ascendentemente la estimación.

Por otro lado, uno de los retos para incursionar en el reciclaje de las baterías de litio es la falta de un mercado regulado, lo que significa una serie de retos que hay que sobrepasar en México como son: *1*) la informalidad de los trabajadores que laboran en el sector de los residuos, *2*) condiciones adecuadas para los trabajadores que manejan residuos de baterías, *3*) formalización de mercados de reciclaje para evitar mercados negros, *4*) la falta de inversión en investigación y desarrollo en reciclaje y *5*) la formación de una empresa pública o mixta que pueda dar estabilidad al sector.

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos LGPGIR (DOF, 2023), las baterías primarias o secundarias, desechables o recargables, son consideradas residuos de manejo especial, lo que significa que las facultades recaerán en los estados y municipios. Los residuos de manejo especial como las baterías de litio deben cumplir con un plan de manejo a partir de responsabilidad compartida, entre gobierno y empresas.

Según la LGPGIR, los municipios tienen jurisdicción sobre los residuos de manejo especial, este hecho provoca un amplio abanico de posibilidades en la recolección y el tratamiento, por lo que deberán homologarse para obtener el material reciclable en las condiciones necesarias.

Los planes de manejo deben conectarse con las empresas recicladoras, para evitar intermediarios que impidan que el material llegue a las plantas recicladoras autorizadas, evitando mercados negros donde puedan perderse o fugarse recursos.

Uno de los retos más importantes, es la regulación de los agentes independientes, porque implica formalizar el trabajo de separar, recolectar y vender materiales valorizables, con la finalidad de que no salgan del mercado formal e internacional. La importancia de que el litio no salga del país como residuo es evitar que se fugue la oportunidad de hacerse de recursos para producción de baterías.

Para que en México se genere un mercado fuerte de reciclaje necesita que exista una empresa pública, mixta o privada que se encargue de la tarea del reciclaje en toda la cadena del valor, esto traerá consigo el ahorro

en costos fijos —trasporte, que es uno de los costos ocultos en la cadena de reciclaje—; y que se regule el mercado traerá costos políticos importantes, pero grandes beneficios económicos y sociales. Además, se requiere promover el reciclaje, otorgar incentivos fiscales o de otro tipo para atraer inversión privada, calcular el retorno esperado en la inversión y recuperarla; pero, sobre todo, se necesitará invertir en investigación para competir con la industria internacional ya establecida, procurando disipar las barreras a la entrada de la industria nacional del reciclaje.

Dadas las características antes señaladas para México, uno de los retos más importantes será generar un programa a nivel nacional para recolectar, tratar y obtener los materiales de los residuos, formalizar un programa entre gobierno y empresas para evitar fugas del material reciclable y trabajar el proceso de la obtención de los materiales valorizables.

La LGPGIR debería resolver la logística de la cadena de valor de los residuos electrónicos. Actualmente, la logística de la recolección se planeó con el principio de responsabilidad extendida. Desafortunadamente, no queda claro la asignación de responsabilidades en la recolección, tratamiento y disposición de los residuos electrónicos (GIZ, 2019) por lo que hay que aclarar las responsabilidades de los actores, que deberán definirse y escribirse dentro de la LGPGIR.

PERFIL DE TALENTO ESPECIALIZADO PARA IMPULSAR LOS MERCADOS DE LITIO

En esta sección se presentan los perfiles especializados requeridos en el área económico-administrativa con especialidad o formación en finanzas, medio ambiente y en temas de energía (tabla 5). El perfil general es económico administrativo con experiencia en alguno de estos temas, o bien, con formación extracurricular.

El reto es impulsar el proyecto de litio en los mercados nacionales e internacionales promoviendo el desarrollo económico, el beneficio social y la generación de empleos sin dejar de lado el cuidado del medio ambiente.

Tabla 5. Perfiles de talento especializado para impulsar los mercados de litio

TALENTO ESPECIALIZADO / PERFIL PROFESIONAL	CARRERA	CONOCIMIENTOS RELACIONADOS Y HABILIDADES
Licenciatura	Administración Administración de negocios	Experiencia en administración óptima por objetivos, sistemas administrativos, coordinación de los recursos de una organización, supervisión y gestión de proyectos y control del desempeño organizacional
	Economía y Finanzas	Modelos de negocios, gestión económica, aspectos financieros y evaluación de proyectos de inversión
	Economía y Actuaría	Análisis económico, análisis estadístico y procesos de producción
Ingeniería	Ingeniería ambiental	Seguridad y riesgos, procesos de reciclaje, procesos de eficiencia energética en la producción, manejo de modelos de evaluación de procesos, soluciones a problemas relacionados con la producción minera y soluciones de remediación y prevención
Especialización, diplomado o curso	Economía ambiental Economía de la energía Economía ecológica	Análisis ambiental económico ambiental, soluciones de economía circular, desarrollo económico y energía, uso de metodologías de economía ambiental, conocimientos de economía ecológica, conocimientos de una evaluación de impacto ambiental, y métodos de reciclaje y segundo uso

Fuente: elaboración propia.

Los perfiles que ofrecen las instituciones de educación superior públicas o privadas son suficientes, sin embargo, se requiere la especialización en temas de medio ambiente y energía. Los conocimientos en medio ambiente y energía pueden obtenerse de posgrados, cursos, diplomados o especialidades que ya existen. Con base en lo anterior, el país tiene la capacidad de generar los profesionales que se requieren para impulsar el mercado de litio en México y apoyar a la empresa Litio para México en su administración.

CONSIDERACIONES FINALES

Por los problemas generados por el cambio climático y la contaminación ambiental y sabiendo que el transporte, especialmente el privado, es el principal generador de emisiones de CO_2, se busca alternativas a la movilidad, como incentivar el transporte público y promover energías más limpias.

Los vehículos eléctricos son una alternativa para disminuir las emisiones contaminantes porque son más eficientes que los automotores convencionales. Pueden convertir entre el 59 y el 62% de la energía suministrada en movimiento de las ruedas, a diferencia de los vehículos de gasolina que transforman entre el 17 y el 21% de la energía en movimiento (Li et al., 2018). En los últimos años han crecido las ventas de autos eléctricos, lo que ha provocado un aumento en la demanda de litio y otros materiales necesarios para su producción y la de sus componentes.

Por lo anterior, el estudio de la cadena de valor de litio es indispensable para que México pueda insertarse en uno o varios eslabones productivos de dicha cadena y aprovechar el nicho de oportunidad que se presenta, además de contribuir al objetivo de disminuir el calentamiento global. El proyecto que lleva a cabo Conahcyt sobre la cadena de valor del litio considera tres eslabones productivos: *1*) la prospección y exploración de minerales de litio y otros elementos críticos, *2*) el beneficio y metalurgia extractiva de litio, y *3*) la fabricación de electrodos, celdas y baterías de ion litio.

Además de los eslabones tradicionales, se exploró la posibilidad de insertar el reciclaje de baterías en México dentro de la cadena de valor de litio como una opción de acceso al recurso y a otros metales valorizables a través del reaprovechamiento de los residuos electrónicos de consumo interno. Esto incluye la oportunidad de regular el mercado de residuos en México para evitar la informalidad de los trabajadores del sector, las condiciones inadecuadas para los trabajadores de residuos

de baterías, la informalidad en el mercado de reciclaje, la generación de mercados negros, la falta de inversión en investigación y desarrollo en el proceso de reciclaje, y fomentar la formación de una empresa de reciclaje pública.

Como recomendaciones finales se propone atender algunos desafíos que permitan avanzar hacia una transición energética exitosa: *1*) incentivar el trabajo interinstitucional para que fortalezca la cadena de valor del litio, *2*) satisfacer la demanda de materias primas de la cadena de valor del litio, *3*) incentivar la investigación científica y tecnológica de fuentes renovables y en tecnologías de almacenamiento a distintas escalas, *4*) desacoplarel crecimiento económico de los ingresos generados por la extracción y el consumo de la energía fósil, *5*) fortalecer la industria eléctrica, y *6*) cambiar los patrones de consumo para mantener a la sociedad dentro de los límites biofísicos del planeta.

REFERENCIAS

Agusdinata, D.B. y Liu, W. (2023). Global sustainability of electric vehicles minerals: A critical review of news media: *The Extractive Industries and Society, 13*, 101231. https://doi.org/10.1016/J.EXIS.2023.101231

Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA) (2023) https://www.amia.com.mx/ventas-de-vehiculos-hibridos-y-electricos1/

Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L. y Van Mierlo, J. (2017). Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. *Energies 10*(9). https://doi.org/10.3390/en10091314.

Bernhart, W. (2023). *Battery monitor 2022: An overview of the battery market*. https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Battery-Monitor- 2022-An-overview-of-the-battery-market.html

Calvo, G., Valero, A. (2022). Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. Environmental Development, 41, 100640. https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2021.100640

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, (2015). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (lgpir). 22.05.15

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, (2015). Ley de transición energética. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ pdf/LTE.pdf

Cambioenergético (2023). ¿Cuánto tiempo tarda en cargar un coche eléctrico? https://www.cambioenergetico.com/blog/tiempo-carga-coche-electrico/

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (cepal) (2018). Informe Nacional de Monitoreo de la eficiencia energética de México, 2018 https://www. cepal.org/es/publicaciones/43612-informe-nacional-monitoreo-la-eficiencia-energetica-mexico-2018

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (cepal) (2023a). Extracción e industrialización del litio. Oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (cepal) (2023b). Litio, un recurso estratégico. Gobernanza, redes globales de producción y sostenibilidad (cepal).

Committee on Critical mineral impacts on the u. s. Economy (2008). Minerals, critical minerals, and the u. s. economy. The National Academies Press, 245.

Diario Oficial de la Federación (2023). Decreto por el que, por causa de utilidad pública, se declara zona de reserva minera de litio la denominada "Li-MX 1". https://www. dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5680091&fecha=18/02/2023#gsc. tab=0

Diario Oficial de la Federación DOF (2023). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR) https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf

Ding, Y., Cano, Z.P., Yu, A., Lu, J. y Chen, Z. (2019). Automotive li-ion batteries: Current status and future perspectives. Electrochemical Energy Reviews, 2(1), 1.

Dunn J., Kelly J., James and Gallagher, G., (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction, Energy Environ. Sci., 2015, 8,158 –168

EV-Volumen (2023). Global Electric Vehicle Sales and Forecast Data You Can Trust. https://ev-volumes.com/#form

Eco-nion (2010). Movilidad Urbana Sostenible (curso) https://www.bizkaia. eus/fitxategiak/07/Mediateka/3_Modulo0_movilidad_urbana.pdf?hash=b1b75b9bb6832e59455dbb360f5afe8b

Eheliyagoda, D., Zeng, X. y Li, J. (2020). A method to assess national metal criticality: the environment as a foremost measurement. Humanities and Social Sciences Communications, 7(1), 1–12. https://doi.org/10.1057/s41599-020-00537-4

Ferrari, L. (2022). La fiebre del litio. Boletín Conahcyt, 4, 95-104.

Fleischmann, J., Mikael Hanicke, Evan Horetsky, Dina Ibrahim, Sören Jautelat, Martin Linder, Patrick Schaufuss, Lukas Torscht y Rijt, A.V.d. (2023). Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. McKinsey & Company https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular

Fortune Business Insights (2023). Metals and minerals, market research report-lithium market size. https://www.fortunebusinessinsights.com/lithium-market-104052. 2023.

Gaines, L., (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. Sustainable Materials and Technologies.

Gavi. The Vaccine Alliace (2020). Annual progress report https://www.gavi.org/sites/default/files/programmes-impact/our-impact/apr/Gavi-Progress-Report-2020.pdf

Gielen, D. (2021). Critical materials for energy transition. International Renewable Energy Agency.

Gielen, D. (2021). Critical materials for the energy transition, International Renewable Energy Agency, (Irena)

Giese, E.C. (2022). Strategic minerals: Global challenges post-COVID-19. The Extractive Industries and Society (12), 101113. https://doi.org/10.1016/J.EXIS.2022.101113

GIZ (2019). Residuos electrónicos en México y su potencial consumo sustentable https://iki-alliance.mx/residuos-electronicos-en-mexico-y-su-potencial-consumo-sustentable/

GIZ (2020). Consumo sustentable y reciclaje de residuos electrónicos em México y Alemania: retos y oportunidades. https://iki-alliance.mx/wp-content/uploads/Consumo-sustentable-y-reciclaje-de-residuos-electr%C3%B3nicos-M%C3%A9xico-y-Alemania.pdf

Glöser-Chahoud, S., Espinoza, L.T., Walz, R. y Faulstich, M. (2016). Taking the Step towards a More Dynamic View on Raw Material Criticality. An Indicator Based Analysis for Germany and Japan: Resources, 5(4), 45. https://doi.org/10.3390/RESOURCES5040045

Graedel, T.E., Harper, E.M., Nassar, N.T., Nuss, P., Reck, B.K., Turner, B.L. (2015). Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(14), 4257–4262. https://www. pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1500415112

Grohol, M. y Veeh, C. (2023). Study on the critical raw materials for the eu 2023. Publications Office of the European Union, https://data.europa.eu/ doi/10.2873/725585

Haglund, D.G. (1984). Strategic minerals: A conceptual analysis. Resources Policy, 10(3), 146–152. https://doi.org/10.1016/0301-4207(84)90029-1

Harper, G.& others, 2019, Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles.: Nature 575(http://dx.doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5), 75–86.

Hatayama, H. y Tahara, K. (2015). Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. Materials Transactions, 56(2), 229–235. https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014380

IPCC, (2023). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland, pp. 1-34.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), (2017). Análisis de ciclo de vida para tecnologías de transporte seleccionadas bajas en carbono.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), (2020) Metodología para la identificación y cuantificación de acciones de mitigación por el reciclaje de residuos sólidos urbanos, p. 8

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), (2023) Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (Inegycei).

Instituto Nacional de Economía Social (Inaes), (2019) Conoce las cadenas de valor https://www.gob.mx/inaes/articulos/conoce-las-cadenas-de-valor

Instituto Nacional de la Economía Social (Inaes) (2009). Conoce las cadenas de valor https://www.gob.mx/inaes/articulos/conoce-las-cadenas-de-valor#:~:text=Se%20conoce%20como%20cadena%20de,y%20actividades%20 de%20una%20empresa.&text=Las%20cadenas%20de%20valor%20 abarcan%20todas%20las%20partes%20de%20un%20proceso

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2020). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa. https://cuentame.inegi.org.mx/economia/pibpc.aspx?tema=e

International Council on Clean Transportation (2021). Driving a green future a retrospective review of China's electric vehicle https://theicct.org/wp-content/ uploads/2021/06/China-green-future-ev-jan2021.pdf

International Energy Agency (2020). Global EV Outlook. Entering the decade of electric drive? https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6- becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf

International Energy Agency (IEA) (2022). The role of critical minerals in clean energy transitions. https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

Jones, B., Acuña, F. y Rodríguez, V. (2021). Cadena de valor del litio: análisis de la cadena global de valor de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos. Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal).

Kesler, S., Gruber, P., Medina, P., Keoleian, G., Everson, M. and Wallington, T., (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. Ore Geology Reviews, vol. 48. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006

LMC Automotive (2023). LMC Automotive Global Light Vehicle Sales Update (April 2023) https://www.globaldata.com/industries-we-cover/automotive/

Li, L., Dababneh y F., Zhao, J. (2018). Cost-effective supply chain for electric vehicle battery remanufacturing. Applied Energy, 226, 277-286.

Liu, W., Placke, T. y Chau, K.T. (2022). Overview of batteries and battery management for electric vehicles. Energy Reports, 8, 4058. https://doi.org/10.1016/j. egyr.2022.03.016

Mayyas, Ahmad, Darlene Steward y Margaret Mann. The Case for Recycling: Overview and Challenges in the Material Supply Chain for Automotive Li- Ion Batteries. Sustainable Materials and Technologies, 19, 2019.

Ministerio de minas y energías, (2019). Minerales estratégicos. Metodología aplicada, 1–66 p.

Organization for Economic Co-operation and Development (oecd) (2023), Waste: Municipal waste, https://doi.org/10.1787/data-00601-en

Prieto Curiel, R. (2003). El inventario de la movilidad de México. Nexos marzo México, https://datos.nexos.com.mx/el-inventario-de-la-movilidad-de-mexico/

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (profepa), (2022). Día mundial del reciclaje https://www.gob.mx/profepa/articulos/dia-mundial-del-reciclaje-302147?idiom=es

Richardson, K., (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. Science Advances, 9(37), https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458

San Diego Gas & Electric Company (2022). The Path to Net Zero: A decarbonization roadmap for California.

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (semarnat) (2018). Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Informe del Medio Ambiente.

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (semarnat), (2011). Directorio de Centros de acopio de materiales provenientes de residuos en México 2010. https:// biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/directorio_residuos.pdf

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (semarnat), (2017). Caracterización de la industria formal e informal del reciclaje de residuos electrónicos en México. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Proyecto #92723 Manejo Ambientalmente Adecuado de

Residuos con Contaminantes Orgánicos Persistentes, (Residuos COP). México, 2017.

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (semarnat), (2017). Inventario de generación de residuos electrónicos en México. Escala nacional y estatal para Jalisco, Baja California, y Ciudad de México. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Proyecto #92723 Manejo Ambientalmente Adecuado de Residuos con Contaminantes Orgánicos Persistentes, (Residuos COP). México.

Secretaría de Economía, (2014). Perfil de mercado de litio https://www.gob.mx/cms/ uploads/attachment/file/624816/15Perfil_Litio_2020__T_.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (semarnat). Buscan Semarnat y pnud manejo adecuado de residuos electrónicos para evitar afectaciones a la salud y al medio ambiente. https://www.gob.mx/semarnat/prensa/buscan-semarnat-y-pnud-manejo-adecuado-de-residuos-electronicos-para-evitar-afectaciones-a-la-salud-y-al-medioambiente#:~:text=Anualmente%2C%20en%20 M%C3%A9xico%20se%20produce,riesgo%20la%20salud%20de%20las

United Nations Human Settlement Programme (UN-HABITAT) (2020). Annual Report 2020 https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/05/annual_progress_report_2020_final.pdf

USGS Geological Survey, (2015). Mineral commodity summaries 2015, u.s. Geological Survey, 196 p., http://dx.doi.org/10.3133/70140094

USGS Geological Survey, (2017). Mineral commodity summaries 2017, u.s. Geological Survey, 202 p.,

USGS Geological Survey, (2019). Mineral commodity summaries 2019, u.s. Geological Survey, 200 p., https://doi.org/10.3133/70202434.

USGS Geological Survey, (2020). Mineral commodity summaries 2020, u.s. Geological Survey, 200 p., https://doi.org/10.3133/ mcs2020.

USGS Geological Survey, (2021). Mineral commodity summaries 2021, u.s. Geological Survey, 200 p., https://doi.org/10.3133/mcs2021.

USGS Geological Survey, (2023). Mineral commodity summaries 2023, u.s. Geological Survey, 210 p., https://doi.org/10.3133/mcs2023.

Verified Market Research, (2023). Lithium-ion battery market size and forecast. https://www.verifiedmarketresearch.com/product/lithium-ion-battery-market/.

World Economic Forum, & Platform for Accelerating the Circular Economy (pace) (2019). A New Circular Vision for Electronics: Time for a Global Reboot. https:// wedocs.unep.org/20.500.11822/32762.

World Nuclear Association. (2023). World Uranium Mining Production. https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx

Yan, W., Wang, Z., Cao, H., Zhang, Y. y Sun, Z. (2021). Criticality assessment of metal resources in China. iScience 24(6), 102524. https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2021.102524

Zappettini, E. (2021). Minerales y metales críticos y estratégicos: análisis de situación y metodología de clasificación para la República Argentina: Servicio Geológico Minero Argentino. Recursos minerales, 45, 1–19.

Zhao, H., Wang, Y. y Cheng, H. (2023). Recent advances in lithium extraction from lithium-bearing clay minerals. Hydrometallurgy, 217(106025).

2. Prospectiva y exploración

RESUMEN

El litio es un elemento que actualmente se encuentra en un periodo de alta demanda por su relevancia para producir baterías de ion litio. Su importancia económica lo ha llevado a formar parte del grupo de minerales críticos y estratégicos a nivel mundial. Las reservas de litio se encuentran en regiones limitadas de la superficie terrestre, por lo que en los últimos años se han hecho grandes esfuerzos por entender los procesos naturales que originaron los yacimientos en los que se encuentra y, con base en ello, identificar, evaluar y aprovechar nuevos yacimientos alrededor del mundo.

El litio rentable en términos económicos se encuentra sólo en algunos minerales (espodumena, lepidolita, arcillas y iones disueltos), aunque existen más de 120 especies que contienen a este elemento en su estructura cristalina. Estos minerales se asocian a tres tipologías de yacimientos: *1*) pegmatitas, *2*) salares y salmueras y *3*) horizontes de arcillas, arenisca y tobas asociadas a zonas volcánicas. Cada una de estas tipologías tiene características geológicas distintivas que permiten identificar blancos de exploración.

Actualmente, la principal producción de litio se encuentra en Australia, en el llamado "triángulo del litio" en Sudamérica y suroeste de China. Otros países alrededor del mundo producen menores cantidades de este elemento, y otros –incluido México– han logrado evaluar y certificar reservas de litio que tienen el potencial de ser explotadas a futuro.

En vista de que México se encuentra dentro del grupo de países con reservas de litio certificadas, el Gobierno ha implementado estrategias para alcanzar una soberanía nacional respecto a la exploración y aprovechamiento de litio. Una de ellas es el desarrollo de investigación científica –liderada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt)–, con el objetivo de definir estrategias de exploración geológica que permitan identificar zonas con concentraciones anómalamente altas de litio.

Con el fin de difundir al público en general el estado del arte de los yacimientos de litio, en este capítulo se describen sus generalidades y las de los depósitos identificados en México, así como los tipos de yacimientos, las metodologías implementadas para su exploración y los avances alcanzados en el país.

Figura 1. Mapa de ruta de la exploración de depósitos de litio en México



Fuente: elaboración propia.

MAPA DE RUTA

La figura 1 muestra el mapa de ruta propuesto para alcanzar los objetivos de la exploración geológica enfocada hacia el factible aprovechamiento y beneficio del litio identificado en depósitos dentro del territorio mexicano. El mapa señala tres periodos en los que se desarrollarán planes para la primera fase de la cadena de valor del litio. Los planes inician con un proyecto de investigación financiado por Conahcyt y fortalecido por el programa de investigadores por México. Los planes a futuro se enfocan en la identificación y cuantificación de recursos y finalmente en la producción minera de litio que funcione como materia prima para las fases subsecuentes de la cadena de valor de litio.

INTRODUCCIÓN

Uno de los minerales críticos que ha ganado más relevancia a nivel internacional en los últimos años es el litio. Pasó de ser un elemento de utilidades puntuales en la industria a uno de mayor demanda para la fabricación de baterías. Los recursos identificados de litio se encuentran distribuidos en sólo 24 países, incluyendo México, de los cuales, sólo cuatro presentan una producción significativa: Argentina, Australia, China y Chile (tabla 1). Aunque en México se validaron las reservas de litio, como en la mayoría de los países, no existen aún minas en producción (tabla 1).

Tabla 1. Principales países con recursos identificados y medidos de litio

PAÍS	RECURSOS IDENTIFICADOS (MT)	PAÍS	RECURSOS IDENTIFICADOS (MT)	PAÍS	RECURSOS IDENTIFICADOS (MT)
Bolivia	23	México	1.7	España	0.32
Argentina	22	República Checa	1.3	Portugal	0.27

PAÍS	RECURSOS IDENTIFICADOS (MT)	PAÍS	RECURSOS IDENTIFICADOS (MT)	PAÍS	RECURSOS IDENTIFICADOS (MT)
Chile	11	Serbia	1.2	Namibia	0.23
Australia	8.7	Rusia	1	Ghana	0.2
China	6.8	Perú	1	Finlandia	0.068
Alemania	3.8	Mali	0.89	Austria	0.06
Congo	3	Brasil	0.8	Kazajistán	0.05
Canadá	3	Zimbabue	0.69		

Fuente: U. S. Geological Survey (2024).

Aunque el litio es un elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre, sólo pocas regiones presentan concentraciones suficientes para obtener beneficio económico de su extracción. Las concentraciones naturales de litio en la tierra varían de 1.5 hasta 24 partes por millón o PPM —o 24 gramos de litio por una tonelada de roca—. El incremento de esta concentración, lo que es determinante para la formación de yacimientos, depende de factores geológicos: los procesos de diferenciación magmática; evolución, edad y espesor de la corteza continental; y procesos hidrotermales, entre otros (Bowell et al., 2020; Chen et al., 2020). La ocurrencia de altas concentraciones de litio se restringe sólo a algunos tipos de minerales y ambientes geológicos. Debido a la alta demanda de litio y el incremento importante de su precio (capítulo 1), durante la última década se han hecho grandes esfuerzos de exploración a nivel internacional para satisfacer su demanda.

Los depósitos de litio han sido bien reconocidos en distintas partes del mundo (p. ej. Argentina, Australia, Bolivia, Canadá, Chile y China, entre otros), sin embargo, estos depósitos presentan grandes retos en el entendimiento de los procesos que los originan, lo cual determina su localización, distribución y dimensión. En los siguientes apartados se describen el estado del arte y las características geológicas distintivas de los yacimientos de litio, lo cual permitirá al lector entender los factores geológicos que

controlan la formación de yacimientos de litio, así como las razones de su localizada distribución geográfica. Además, se muestran las características de los depósitos reconocidos y de aquellos que pudieran serlo a futuro en el territorio mexicano.

Con base en lo anterior, es indispensable que la exploración geológica de estos depósitos sea acompañada de investigación científica. En el caso de México, un país con potenciales recursos de litio y en donde el Gobierno, a través del Conahcyt, ha impulsado un importante proyecto con el fin de establecer guías de exploración de depósitos de litio en México y con ello sentar la base de una exploración con el uso óptimo de recursos. Esto será tratado también dentro de este capítulo y, con base en la experiencia de este proyecto, también se sugieren los perfiles de talento especializado que ayudarían a impulsar y desarrollar proyectos de exploración con mayor eficacia.

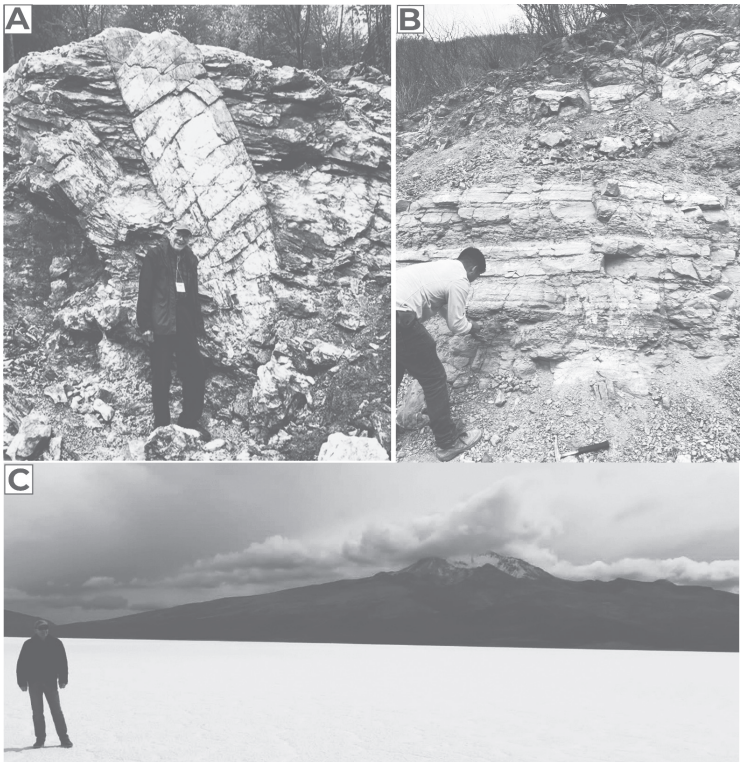
ESTADO DEL ARTE DE LOS YACIMIENTOS DE LITIO

El litio es un elemento del grupo de los metales alcalinos con bajo número atómico (Z=3), de radio iónico pequeño (0.76 Å) y con dos isótopos estables: 6Li y 7Li, con abundancia de un 8% y 92%, respectivamente (de Dinechin et al., 2023). Este elemento, con una amplia distribución en bajas concentraciones en la tierra, de 24, 12 y 13 ppm en la corteza continental superior, media e inferior, respectivamente, y de 1.5 PPM en el manto (Rudnick y Gao, 2014; Liu et al., 2018).

Existen tres principales tipos de yacimientos de litio (figura 2), diferenciados por el tipo de roca y minerales que contienen el metal: *1*) pegmatitas y rocas asociadas a sus procesos de metasomatismo; *2*) salmueras en salares, y *3*) depósitos asociados a horizontes de arcillas, tobas y arenisca en sucesiones vulcanosedimentarias. Los yacimientos tipo pegmatitas del occidente de Australia son los principales productores de litio a nivel mundial; algunos de los yacimientos en salmueras de Bolivia representan las mayores reservas; y los yacimientos asociados a

arcillas se encuentran aún en fase de evaluación, aunque existen algunos con reservas probadas que representan una considerable reserva de litio (tabla 2).

Figura 2. Imágenes que muestran las tres principales tipologías de yacimientos de litio



Nota: *a*) Pegmatita con cristal de espodumena (dimensiones: 4.5 x 0.9 x0.6 m), localizada en Plumbago, Maine, EE. UU. *b*) Estratos de rocas vulcanosedimentarias con presencia de arcillas ricas en litio. Localidad de Bacadéhuachi, Sonora, México. *c*) Vista panorámica del salar Uyuni, Bolivia. **Fuente:** *a*) Simmons y colaboradores (2020). *b*) Juan Carlos Castillo. *c*) Luca Ferrari.

En estos tipos de yacimientos se han reconocido 124 minerales cuya composición química incluye litio, de los cuales el 73% pertenece al

grupo mineral de los silicatos (base de SiO4), el 19% al de los fosfatos (PO_4) y el 8% a los de los carbonatos, fluoruros, óxidos e hidróxidos, boratos y arseniatos (Grew, 2020). Sólo cuatro de estos minerales están presentes en las reservas económicas reconocidas: la espodumena y la lepidolita, en rocas ígneas llamadas pegmatitas, las arcillas –hectorita– y las sales y iones disueltos, en lagos intermitentes o salares (Bowell et al., 2020). La espodumena es el mineral que representa el volumen comercial de litio más importante y proviene en su mayoría de pegmatitas del oeste de Australia (Meshram et al., 2014).

El origen primordial del litio en la superficie terrestre se relaciona de manera directa con procesos magmáticos, es decir, la evolución de magmas –roca fundida– en el interior de la corteza continental. Los tres tipos de depósitos tienen una fuente en común: un magmatismo cortical evolucionado/alcalino a peralcalino (Neukampf et al., 2023). Las pegmatitas ricas en litio son productos tardíos de fusión parcial o varias etapas de fusión de fases magmáticas (Koopmans et al., 2023). Los salares ricos en litio se relacionan con la circulación de agua caliente en la corteza que lixivia elementos de interés en estas mismas fases magmáticas enriquecidas. En el mismo sentido, los contenidos anómalos de litio en arcillas son producto de la alteración de rocas volcánicas que representan las fases efusivas y aéreas de fases magmáticas enriquecidas en metales como el litio (Bowell et al., 2020). Los detalles de cada tipología serán descritos a continuación.

Tabla 2. Depósitos de litio de clase mundial

DEPÓSITO	TIPO	LOCALIZACIÓN	EMPRESA MINERA	LI (KT)	% EN PESO DE LI	RECURSOS/ RESERVAS
Greenbushes	Pegmatita	Greenbushes (Australia)	Tianqi Lithium	943	1.091	R
Wodgina	Pegmatita	Pilbara (Australia)	Mineral Resources	826	0.543	R

DEPÓSITO	TIPO	LOCALIZACIÓN	EMPRESA MINERA	LI (KT)	% EN PESO DE LI	RECURSOS/ RESERVAS
Earl Grey	Pegmatita	Goldfields (Australia)	Kidman Resources & SQM	658	0.697	R
Pilgangoora	Pegmatita	Pilbara (Australia)	Pilbara Minerals	628	0.58	R
Grota do Cirilo	Pegmatita	Minas Gerais (Brasil)	Sigma Lithium	293	0.641	r: M+I
Whabouchi	Pegmatita	Quebec (Canadá)	Nemaska Lithium	220	0.604	R
Arcadia	Pegmatita	Harare (Zimbabue)	Prospect Resources	164	0.608	R
Tanco	Pegmatita	Manitoba (Canadá)	Sinonime Rare Metals	110	1.18	R
Atacama	Salmuera	Atacama (Chile)	SQM; Albermarle	6300	0.184	R
Uyuni	Salmuera	Oruro y Potosí (Bolivia)	COMIBOL	3600	0.045	R
Zhabuye	Salmuera	Tíbet	Tíbet Shigatse & Tianqi	1500	0.1	R
Centenario	Salmuera	Salta (Argentina)	Eramet	921	0.045	r: M+I
Hombre Muerto	Salmuera	Catamarca (Argentina)	Livent	835	0.071	R
Olaroz/ Cauchari	Salmuera	Jujuy (Argentina)	Orocobre	345	0.053	r: M+I
Cauchari	Salmuera	Jujuy (Argentina)	Lithium Americas & Exar	282	0.069	R
Maricunga	Salmuera	Atacama (Chile)	Minera Salar Blanco	269	0.117	R
3Q	Salmuera	Catamarca (Argentina)	Neo Lithium	243	0.079	R
Salar del Rincón	Salmuera	Salta (Argentina)	Argosy Minerals	203	0.032	R
Clayton Valley	Salmuera	Nevada (EE. UU.)	Pure Energy Minerals	41	0.012	R
Sonora	Arcillas	Sonora (México)	Bacanora & Ganfeng	845	0.229	R

DEPÓSITO	TIPO	LOCALIZACIÓN	EMPRESA MINERA	LI (KT)	% EN PESO DE LI	RECURSOS/ RESERVAS
Thacker Pass	Arcillas	Nevada (EE. UU.)	Lithium Americas	582	0.236	R
Rhyolite Ridge	Arcillas	Nevada (EE. UU.)	Inoneer Resources	209	0.012	r: M+I
Falchani	Toba	Puno (Perú)	Plateau Energy Metals	146	0.296	r: I
Jadar	Jadarita	Jadar (Serbia)	Rio Tinto	435	0.836	r: I

Nota: Símbolos de recursos/reservas: R–reserva; r–recurso; M–medidas; I–indicadas.
Fuente: modificada de Bowell y colaboradores (2020).

TIPOLOGÍAS DE YACIMIENTOS DE LITIO

Pegmatitas

Las pegmatitas son rocas ígneas intrusivas —cristalizadas en el interior de la corteza terrestre—, compuestas por cristales de grano muy grueso —desde centímetros hasta varios metros de largo— de feldespato, cuarzo y mica (figura 2). Las pegmatitas se asocian sobre todo a corteza continental antigua, de entre 3 000 y 500 millones de años (Ma) (Grew, 2020). La historia geológica de este tipo de rocas representa las intrusiones más jóvenes dentro del proceso de formación de cuerpos ígneos de composición granítica. Las pegmatitas son estructuras de escala métrica, en comparación con los granitos, —cuya escala es kilométrica—, son rocas con importantes variaciones internas de composición química y de fábrica, el tamaño de sus cristales aumenta desde la periferia hacia el núcleo. Además presentan bandeamientos paralelos a las rocas en las que se encuentran emplazadas y tienen zoneamientos caracterizados por cambios en la composición mineralógica (London, 2014).

Alrededor del 10% de las pegmatitas estudiadas a nivel mundial contiene variedades minerales cuya composición química incluye elementos como el niobio, cesio, tántalo, berilio y litio, entre otros (Dill, 2015). Existen

distintos tipos de pegmatitas, caracterizadas de forma principal por su composición química y contenidos de elementos traza dentro de su mineralogía. De acuerdo con Cerny (1991), las pegmatitas se pueden agrupar en dos familias: *1*) familia de pegmatitas con litio, cesio y tántalo (LCT) y *2*) pegmatitas con niobio, itrio y flúor (NYF). Las pegmatitas tipo LCT forman parte de los principales yacimientos de litio a nivel mundial (tabla 3); destacan en gran medida aquellas pegmatitas con espodumena —principal mineral explotado para la obtención de litio—. Aunque también existen otros minerales con altos contenidos de litio, éstos son menos comunes en pegmatitas (tabla 3).

El origen de las pegmatitas tipo LCT está relacionado a procesos de fusión de rocas sedimentarias ricas en litio o a extrema diferenciación magmática de granitos pobres en calcio (London, 2008; Grew, 2020).

Las pegmatitas con espodumena y lepidolita, explotadas por litio sobre todo en el oeste de Australia, representan alrededor del 54% de la producción anual de litio (Haddad et al., 2023). Otros yacimientos de litio en pegmatitas menos importantes se encuentran en China, Canadá y Brasil (figura 3).

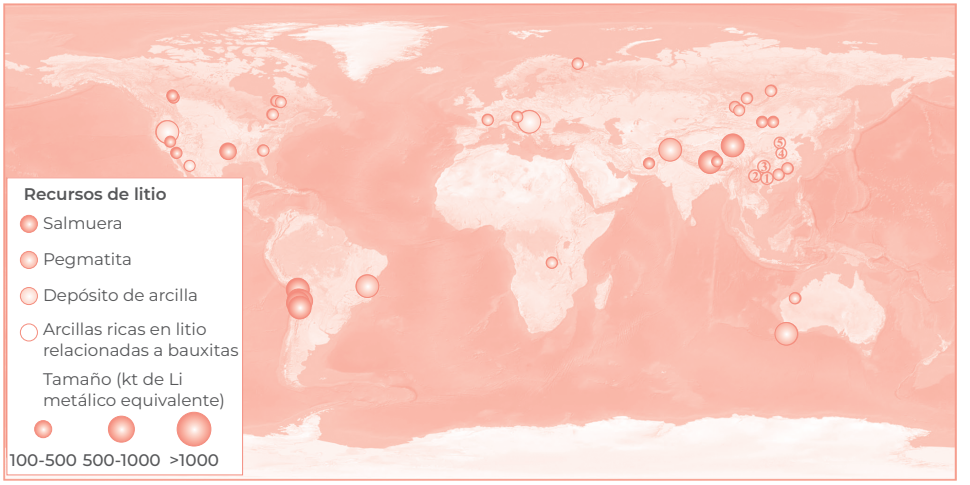
Tabla 3. Principales minerales de litio en pegmatitas

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	% DE CONTENIDO DE LITIO (RANGO EN MINERALES COMERCIALES)	OCURRENCIA
Espodumena	$LiAlSi_2O_6$	1.9–3.3	Australia- Canadá
Lepidolita (serie de polilitionita-trilitionita)	$KLi_2Al(Si_4O10)(F,OH)_2$ a $K(Li_{1.5}Al_{1.5})(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$	1.4–1.9	Australia
Ambligonita	$Li,Al(F,OH)PO_4$	3.5–4.2	África
Trifilita	$Li(Fe,Mn)PO_4$	2.5–3.8	África
Petalita	$LiAlSi_4O_{10}$	1.6–2.21	África
Bikitaita	$LiAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	1.35–1.7	África

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	% DE CONTENIDO DE LITIO (RANGO EN MINERALES COMERCIALES)	OCURRENCIA
Eucriptita	$LiAlSiO_4$	2.34–3.3	África
Montebrasita	$LiAl(PO_4)(OH)$	0.9–1.8	África
Zinnwaldita (serie siderofilita-polilitionita)	$KFe^{2+}2Al(Al_2Si_2O10)(OH)_2$ a $KLi_2Al(Si_4O_{10})(F,OH)_2$	1.21–1.3	Europa
Zabuyelita	Li_2CO_3	18.75 (Valor teórico)	China

Fuente: la fórmula química, el contenido de litio y la ocurrencia fueron tomados de Meshram y colaboradores (2014), Bowell y colaboradores (2020) y Mindat.org[1]

Figura 3. Distribución de los principales depósitos de litio con recursos importantes



Fuente: adaptada de Ling y colaboradores (2023).

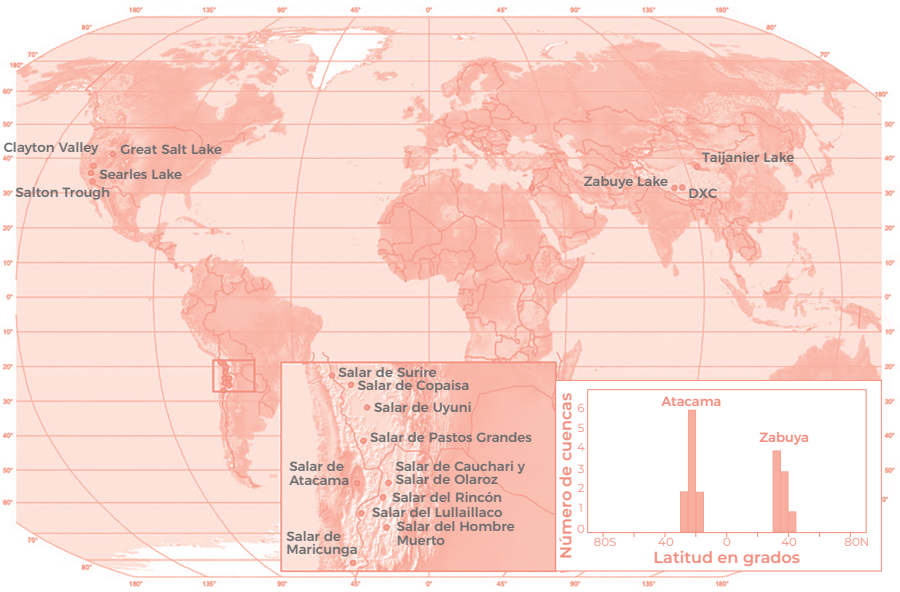
[1] En https://www.mindat.org/

Salares y salmueras

Uno de los ambientes tectónicos más estudiados, donde se forman yacimientos de litio, son las cuencas continentales, cuyos sistemas sedimentarios incluyen depósitos lacustres que forman salares y salmueras asociadas. En términos económicos, este tipo de ambientes geológicos representa la fuente más rentable para la extracción de litio (Munk et al., 2016). Los principales yacimientos en etapa de producción se encuentran en la región llamada "el triángulo del litio" (frontera entre Argentina, Chile y Bolivia), al oeste de la Cordillera de los Andes. Otros depósitos importantes se encuentran al este de los Estados Unidos, en el Tíbet —al suroeste de China—, en los Andes y en Australia (figura 4, tabla 4).

Esta tipología de yacimientos concentra alrededor del 69 % de las reservas globales de litio (Li et al., 2023). La mayor parte del litio extraído de salmueras se produce en la región del triángulo del litio (45 200 toneladas producidas en 2022 en Chile y Argentina; U. S. Geological Survey, 2023). Además de litio, este tipo de depósitos suelen ser ricos en otros elementos como potasio y sodio (Munk et al., 2016).

Figura 4. Distribución geográfica mundial de los principales depósitos de litio en salmueras continentales



Nota: Se muestra a detalle la región del "triángulo del litio". El histograma de la esquina inferior derecha muestra la distribución bimodal de la ocurrencia de salmueras, las cuales se ubican en zonas subtropicales. La localización y características de las cuencas continentales se describen en la tabla 4.
Fuente: adaptada de Munk y colaboradores (2016).

Tabla 4. Características de las cuencas continentales con altas concentraciones de litio a nivel global

CUENCA	REGIÓN	LATITUD	LONGITUD
Clayton Valley	Nevada	37.76724	–117.58481
Searles Lake	California	35.73175	–117.32930
Salton Sea	California y México	33.25239	–115.71031
Great Salt Lake	Utah, EE. UU.	41.25311	–112.70506
Mar Muerto	Israel	31.15663	35.43786
Salar de Atacama	Chile	–23.50069	–68.24984
Salar de Maricunda	Chile	–26.93605	–69.06936
Salar de Surire	Chile	–18.83700	–69.005
Salar del Hombre Muerto	Argentina	–25.38555	–67.13364
Salar del Rincón	Argentina	–24.07478	–67.08165
Sald de Olaroz y Salar de Cauchari	Argentina	–23.45187	–66.68484
Salar de Llullaillaco (Mariana)	Argentina	–24.80602	–68.29033
Salar de Uyuni	Bolivia	–20.15888	–67.56912
Salar de Copaisa	Bolivia	–19.36163	–68.16860
Salar de Pastos Grandes	Bolivia	–21.64429	–67.79809
Lago Taijanier	Qaidam, China	37.4926	93.95323
Lago Zhabuye	Tíbet	31.34586	84.04752
Dangxiongcuo	Tíbet	31.57053	86.7358

Fuente: Munk y colaboradores (2016).

CONCENTRACIÓN LITIO (MG/L)				RECURSOS TOTALES (MT)
MIN	MAX	PROMEDIO	MANIFESTACIONES TERMALES	
100	300	160	40	0.3
10	80	65	ND	ND
100	400	200	5-100	0.316
18 (norte) 40 (sur)	43 (norte) 64 (sur)	52	1.8-6.5	0.53
ND	ND	10	Muy bajo	ND
900	7000	1400	40	6.3
NA	NA	920	ND	0.22
NA	NA	340	8.3	ND
190	900	521	3.2-5.5	0.8
ND	ND	400	1500	0.223
282 (Olaroz) 200 (Cauchari)	1207 (Olaroz) 2150 (Cauchari)	650 (Olaroz) 510 (Cauchari)	ND	0.9-1.0
250	650	450	ND	ND
80	1150	321	ND	10.2
ND	ND	243	ND	ND
353	1787	1062	5.2 (borde) 67 (playa)	ND
NA	ND	290	ND	2.02
500	1000	680	ND	1.53
NA	ND	430	ND	0.181

Tabla 4. Continuación

TEMP. ANUAL (°C)	PRECIP. (MM/AÑO)	EVAP. (MM/AÑO)	ARIDEZ	RELIEVE (M)	AMBIENTE TECTÓNICO
13	122	1425	Árido	1544	Provincia extensional *Basin and Range*. Entre zona de *core complex* del Neógeno
19.5	85	1659	Árido	1502	Provincia extensional *Basin and Range*
22.7	65	1842	Árido	3568	Cuenca *pull-apart* a lo largo de porción intracontinental del sistema de fallas transformante de San Andreas
10.5	186	1156	Árido	2678	Provincia extensional *Basin and Range*
16.7	58	1467	Árido	3220	Cuenca *pull-apart* a lo largo de porción intracontinental del sistema de fallas transformante del Mar Muerto
13.9	39	1440	Árido	3906	Arco volcánico, cuenca marginal de un *plateau*, subsidencia activa, ~6 km de estratos cenozoicos
6.6	52	950	Árido	2947	Arco volcánico, cuenca marginal de un *plateau* en altas elevaciones
3.8	247	1100	Semiárido	1523	Arco volcánico, cuenca marginal de un *plateau* en altas elevaciones
6.7	91	1106	Árido	1872	Cuenca tectónica limitada por fallas corticales, caldera volcánica silícica adyacente y cuenca hidrográfica dominada por domos resurgentes
8	61	1233	Árido	1872	Cuenca de sierras y valles contraccional, limitadas por fallas corticales, depósitos aluviales y edificios volcánicos
7.2	90	1246	Árido	2250	Cuenca de sierras y valles contraccional, limitadas por fallas corticales, depósitos aluviales y edificios volcánicos
7.8	30	1148	Hiperárido	893	Arco volcánico, cuenca intra-arco
9.3	62	1318	Árido	2483	Altiplano, bajo relieve, volcanismo menor, Complejo Volcánico Altiplano-Puna al sur y cinturón de pliegues y cabalgaduras de al este

TEMP. ANUAL (°C)	PRECIP. (MM/AÑO)	EVAP. (MM/AÑO)	ARIDEZ	RELIEVE (M)	AMBIENTE TECTÓNICO
8.1	320	1316	Semiárido	2888	Altiplano, bajo relieve, volcanismo menor, Complejo Volcánico Altiplano-Puna al sur y cinturón de pliegues y cabalgaduras de al este
4.1	57	1094	Árido	1387	*Plateau* Altiplano, ocupa una caldera de ~5.2 Ma en el norte del Complejo Volcánico Altiplano-Puna
4.2	167	989	Árido	4138	Estructura de sinclinal dentro de cuenca intracontinental tipo *foreland* asociada al orógeno colisional Himalayas-Tíbet
0.2	287	750	Semiárido	2156	Rift del Neógeno orientado a grado alto al grano estructural orogénico en la placa superior de orogeno colisional Himalayas-Tíbet
0.5	184	783	Semiárido	1844	Rift del Neógeno orientado a grado alto al grano estructural orogénico en la placa superior de orogeno colisional Himalayas-Tíbet

Fuente: Munk y colaboradores (2016).

Una salmuera se define como una solución que contiene un total de sales disueltas a concentraciones que superan las del agua de mar, es decir, mayores al 3.5 % de sales en peso (Kharaka y Hanor, 2003). El término *salar* se refiere a una mezcla de: *1*) cuerpos permanentes de agua salada, los cuales suelen tener profundidades de centímetros a algunos metros; *2*) playas, las cuales son cuerpos salinos someros (<20 cm) y efímeros que ocupan áreas variables de planicies de lodo en depresiones centrales de cuencas continentales, y *3*) costras de sal, las cuales representan las salmueras evaporadas que alcanzaron la saturación de sales —yeso, halita o mirabilita— y que forman capas de sal de ~50 cm; las costras pueden ser activas o fósiles, y estas últimas pueden alcanzar espesores de varios metros (Risacher et al., 2003).

Las salmueras ricas en litio se clasifican como hipersalinas, ya que tienen una salinidad entre 1.7 y 24 veces mayor a la del agua de mar y se

caracterizan por tener concentraciones de iones disueltos cerca del punto de saturación de sales, sobre todo de halita –cloruro de sodio– en salares maduros –salmueras– (Bowell et al., 2020).

De acuerdo con Munk y colaboradores (2016), a nivel global los sistemas de salmueras ricas en litio comparten seis características que controlan la génesis de estos depósitos: *1*) clima árido; *2*) cuencas cerradas que hospedan salares –costra de sal–, un lago salado o ambos; *3*) actividad ígnea e hidrotermal asociada; *4*) subsidencia controlada por procesos tectónicos; *5*) una fuente de litio idónea para generar enriquecimiento del metal, y *6*) tiempo suficiente para concentrar litio en las salmueras. Las características de los principales depósitos reconocidos a nivel mundial aparecen en la tabla 5.

Los salares se agrupan en dos tipologías en función de las rocas que hospedan los depósitos: los salares inmaduros y los salares maduros. Los salares inmaduros están dominados por sedimentos clásticos —arcillas, limos y arenas— con estratos de evaporitas intercalados —halita, ulexita y yeso—. Los salares maduros son dominados por secuencias sedimentarias de halita masiva con menores lentes de sedimentos clásticos (Bowell et al., 2020).

Las concentraciones de litio en este tipo de depósitos son de varios cientos de mg/L (tabla 5) hasta miles de mg/L. El valor máximo medido en el salar de Atacama alcanza los 7 000 mg/L (Garrett, 2004).

Otro tipo de salmueras que son objeto de estudio como una posible fuente no convencional de litio son los cuerpos salinos asociados a campos geotérmicos o petroleros. Las salmueras ricas en litio asociadas a campos geotérmicos han sido reconocidas en la región de Salton Sea, EE. UU., Siberia, Rusia, y el Plateau del Tíbet, donde las concentraciones se encuentran por encima de los 983 mg/L (Werner, 1970; Elders y Cohen, 1983; Williams y McKibben, 1989; Shouakar-Stash et al., 2007; Sanjuan y Millot, 2009; Alekseeva y Alekseev, 2018; Li et al., 2018 y 2019).

Por otro lado, las salmueras en campos petroleros suelen tener concentraciones de litio por debajo de los 10 mg/L, aunque aquellas ricas en

litio tienen concentraciones que pueden superar los 500 mg/L (Blake, 1974; Collins, 1975; Connolly et al., 1990; Moldovanyi et al., 1993; Stueber et al., 1993; Wilson y Long, 1993; Chan et al., 2002; Williams y Hervig, 2005; Tabarés, 2013).

El origen del enriquecimiento del litio en salmueras geotérmicas se debe a distintos factores: fluidos salinos, temperaturas de los fluidos relativamente altas (>120 °C), las rocas que hospedan las salmueras geotérmicas deben tener una mineralogía propicia para contenerlo (p. ej. micas), procesos de interacción agua-roca y posterior precipitación de sales como la halita, alteración hidrotermal con formación de arcillas ricas en litio. Además, los ambientes volcánicos recientes o activos transfieren litio a los sistemas geotérmicos que pueden enriquecer los fluidos en este elemento proveniente de cámaras magmáticas (Bowell et al., 2020; Stringfellow y Dobson, 2021; Toba et al., 2021; Sanjuan et al., 2022).

Arcillas

Las arcillas son minerales de grano extremadamente fino del grupo de los filosilicatos, que incluye también otros minerales como las micas. Los filosilicatos se caracterizan por tener una estructura cristalina básica en un arreglo por capas (Helbert et al., 2015). Por su lado, las arcillas se componen de dos unidades de estructura atómica básicas (Murray, 2007):

1. *Estructura atómica octaédrica*. Las capas se componen de paquetes de oxígeno e hidroxilos, en los cuales existen átomos de aluminio, hierro y magnesio dispuestos en un arreglo octaédrico. Las variaciones de esta estructura básica están controladas sobre todo por la presencia de los cationes Al+3 o Mg+2.

2. *Estructura atómica tetraédrica*. Esta unidad estructural consiste en una capa tetraédrica de silicio donde los átomos se encuentran equidistantes respecto a cuatro átomos de oxígeno o hidroxilos

en forma de tetraedro con el átomo de silicio en el centro. Los tetraedros se unen para formar un arreglo con forma hexagonal repetido de manera infinita y horizontal.

Las dos estructuras básicas de las arcillas se unen por medio de los ápices formados por átomos de oxígeno o hidroxilos para formar dos tipos de arcillas llamadas capa mineral de arcilla 1:1 –p. ej. caolinita– y 2:1 -p. ej. illita. El arreglo y composición de las capas octaédricas y tetraédricas tienen implicaciones en las propiedades fisicoquímicas de cada arcilla (Murray, 2007). En el capítulo 3 se presentan en mayor detalle las características mineralógicas de las arcillas.

La mayoría de los minerales de arcillas se origina por procesos de intemperismo, alteración hidrotermal y diagénesis; los cuales ocurren en niveles superficiales y en niveles subsuperficiales. Los tipos de arcillas presentes en una región representan los productos de las condiciones a las que estuvo expuesta una cuenca sedimentaria, además de brindar información acerca de la interacción agua-roca posterior a la formación de todos los tipos de rocas (Eberl et al., 1984; Merriman, 2005).

Por sus propiedades fisicoquímicas, las arcillas son minerales de interés para distintos usos industriales y de investigación en distintos rubros. En los últimos años, el interés en las arcillas ha aumentado debido a su asociación con depósitos de litio. Aquellos asociados a minerales de arcillas han incrementado su relevancia debido a la evaluación de recursos en la región de McDermitt/Kings Valley en Nevada, EE. UU., y de la región de Bacadéhuachi, Sonora, México, las cuales tienen reservas probadas de ~3.3 Mt y ~1.7 Mt de carbonato de litio equivalente, respectivamente (Ausenco, 2018; Lithium Americas, 2022).

De manera general, los depósitos de Li asociados a arcillas están relacionados a la lixiviación de lavas y ceniza volcánica de composición riolítica a través de la circulación de fluidos meteóricos –agua de lluvia– e hidrotermales –fluidos emplazados desde el interior de la corteza cuyos componentes cristalizan al enfriarse en niveles superficiales–. Además,

la distribución de estos depósitos se encuentra controlada por la estructura química de las arcillas presentes –p. ej. hectorita–, las cuales se forman a partir de sedimentos ricos en ceniza volcánica que son depositados en cuencas continentales adyacentes a las rocas volcánicas que conforman la fuente inicial de litio (Benson et al., 2017). Distintos minerales de arcillas y micas son reconocidos por su alto contenido en litio, pero sólo las arcillas illita y esmectita tienen ocurrencia en depósitos de litio asociados a arcilla (tabla 5).

Tabla 5. Principales minerales considerados del grupo de arcillas que son ricos en litio

MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	CONTENIDO DE LI (%)	OCURRENCIA
Lepidolita	$K[Li_{2-x}Al_{1+x}(Al_{2x}Si_{4-2x}O_{10})\ (OH,F)_2]$ (x = 0–0.5)	1.2–5.9	Pegmatitas
Zinnwaldita	$K[(Li,Fe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH,F)_2]$	2–3	Pegmatitas
Masutomilita	$K[Li_1+x(Mn^{2+}+Fe^{2+})_{1-x}Al(Al_{1-x}Si_{3+x}O_{10})F_{1+x}(OH)_{1-x}]$ (x = 0–0.5)	3.5–5	Pegmatitas
Cookeita	$LiAl_2(OH)_6Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	2.4–4.1	Pegmatitas
Swinefordita*	$(Li,Ca,Na)_{1-x}(H2O)_4[(Al,Li,Mg)_{2+x}(Si,Al)_4Si_3O_{10}(OH,F)_2]$ (x < 1)	4.2–5.7	
Jadarita	$LiNaSiB_3O_7(OH)$	7.3	Rocas sedimentarias
Hectorita*	$(Ca_{0.5}Na)_x(H_2O)_4[(Mg_{3-x}Li)_3Si_4O_{10}(OH,F)_2]$ (x ≈0.33)	1.1–1.3	Depòsitos tipo Skarn, arcillas con Li en calderas

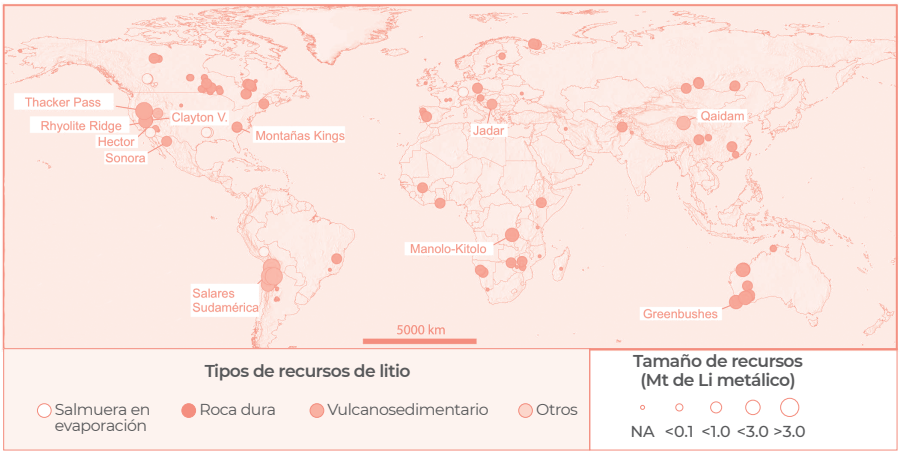
Fuente: modificada de Zhao y colaboradores (2023).

Aunque los depósitos de litio en arcillas representan importantes recursos potenciales, en la actualidad no existen proyectos en producción debido a la complejidad de los métodos y costos de extracción, (capítulo 3), y a la heterogeneidad de los depósitos. Estos potenciales yacimientos se encuentran en sucesiones volcánicas y vulcanosedimentarias. Se han identificado recursos potenciales en EE. UU., México, Irán, Canadá y

Serbia, entre otros (figura 5). Hoy, las reservas conocidas de litio en arcillas representan el 7% de los recursos minerales de litio a nivel global (Zhao et al., 2023).

La alta concentración de Li en arcillas de horizontes en sucesiones sedimentarias se debe a varios factores. Uno es el contenido de litio en la roca fuente, normalmente de origen volcánico. El enriquecimiento primario de litio en las rocas volcánicas se debe al carácter incompatible de este elemento durante los procesos de diferenciación magmática –proceso por el cual el magma se cristaliza y enfría paulatinamente a medida se acerca a la superficie–, así como a la composición y espesor de la corteza continental de las regiones de arcos volcánicos, donde ocurren procesos de fusión parcial y diferenciación magmática (Mahood y Hildreth, 1983; Brenan et al., 1998; Ottolini et al., 2009; Ellis et al., 2018; Neukampf et al., 2019; Chen et al., 2020).

Figura 5. Distribución de los principales depósitos de litio con énfasis en aquellos asociados a arcillas



Nota: Oeste de EE. UU., Sonora, México y Jadar, Serbia. En la esquina inferior izquierda se muestra el tamaño relativo de los recursos estimados para cada depósito.
Fuente: adaptada de Benson y colaboradores (2023).

Los ejemplos en los que se han reportado cuencas de interés económico por sus depósitos de litio en capas de areniscas y arcillas muestran que las rocas ígneas más enriquecidas son aquellas originadas a partir de magmas evolucionados, de anhidros y de composición geoquímica peralcalina (p. ej. Benson et al., 2017 y 2023). Otros factores favorables para el desarrollo de estas anomalías son: *1*) depósito en cuencas endorreicas que restrinjan la movilidad de los sedimentos, *2*) la presencia de un cuerpo de agua que favorezca la conservación de las cenizas volcánicas y su intemperismo, *3*) eventos de evaporación-precipitación, *4*) alteración por intemperismo, *5*) eventos hidrotermales superpuestos, *6*) erosión y redeposición de sedimentos con minerales ricos en litio, y *7*) más de un evento de formación de arcillas (Benson et al., 2017 y 2023; de Dinechin et al., 2023; Ling et al., 2023).

Contexto geológico de México y su relación con posibles depósitos anómalos de litio

El territorio mexicano se compone de un mosaico de provincias geológicas con historias y características distintivas, que reflejan la complejidad de los eventos geológicos desarrollados desde el Proterozoico hasta el Holoceno, lo que ha dado lugar a la configuración actual de los rasgos geológicos y fisiográficos de México (figura 6).

Los eventos geológicos de los que se tiene registro en México se asocian a procesos de interacción de placas tectónicas —subducción y *rifting*— separación, divergencia —continental— sobre todo en el Mesozoico y Cenozoico (Centeno-García, 2017; Ferrari et al., 2018). Estos eventos han propiciado el desarrollo de extensos sistemas volcánicos y la formación de cuencas continentales con características geológicas, temporalidad y distribución geográficas distintivas. Por ejemplo, algunos de estos grandes eventos volcánicos y de formación de cuencas ocurrieron en México durante la era Cenozoica —66 Ma al presente—,

periodo en el que se emplazaron grandes volúmenes de rocas volcánicas que formaron la provincia de la Sierra Madre Occidental (SMO) lo cual culminó con la apertura del actual Golfo de California (Centeno-García, 2018; Ferrari et al., 2018).

Figura 6. Mapa geológico de México en el que se observan las principales provincias geológicas y fisiográficas del país



Fuente: la base geológica es una adaptación del *Atlas de México* del Instituto de Geografía de la UNAM (2007).

El ensamble tectónico del territorio mexicano es propicio para la formación de distintos tipos de yacimientos; desde metálicos y no metálicos a lo largo de la smo (Au, Ag y Cu), de hidrocarburos en el Golfo de México y los depósitos de litio –estudiados recientemente en cuencas continentales–, entre otros. La exploración geológica es indispensable para el reconocimiento y evaluación de nuevas regiones con elementos de interés económico. Éste es el caso de los depósitos con concentraciones anómalas de litio en Chihuahua, Jalisco, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas. Las metodologías usadas para la exploración con fundamentos geológicos regionales y locales serán descritas a continuación.

METODOLOGÍAS DE PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES DE LITIO

TRABAJO DE CAMPO

Las actividades de exploración incluyen un conjunto de acciones que permitan identificar y caracterizar los procesos de formación y ocurrencia de anomalías-concentraciones de litio superiores a las de la corteza. Una anomalía elemental es el resultado de la suma de varios procesos, la existencia de una fuente enriquecida, de un sistema de transporte eficiente y de un proceso fisicoquímico de precipitación del elemento de interés.

Adicionalmente, existen procesos posteriores a la precipitación que influyen en la conservación de la anomalía que puede destruir –p. ej. erosión– o producir un enriquecimiento. La caracterización de las anomalías elementales inicia por un reconocimiento geológico de las áreas de interés y el establecimiento de un contexto cronológico. Para obtener esta información base, los geólogos recaban datos de campo en las áreas de interés identificadas con base en la literatura y datos existentes.

El trabajo de campo consiste en observar, a lo largo de secciones, con apoyo en imágenes de satélite y mapas geológicos previos como los que edita y pone a disposición el Servicio Geológico Mexicano, los tipos de roca

y sedimentos expuestos para establecer sus relaciones geométricas y cronológicas. Las actividades durante las jornadas de trabajo involucran la descripción de las rocas —tipo, color, estructura, textura, granulometría, estratificación y espesor cuando se trata de sucesiones de sedimentos—; contenido de minerales y grado de alteración así como la descripción de posibles deformaciones y sistemas de fallas, fracturas y diaclasas, datos que se consignan e integran a un mapa geológico que incluye, si es el caso, número y tipo de muestras colectadas para su posterior análisis en laboratorio.

En la actualidad, algunas técnicas analíticas de laboratorio se utilizan en campo gracias al desarrollo de dispositivos portátiles que permiten obtener información de la concentración de distintos elementos con mediciones realizadas *in situ*. Éste es el caso de los espectrómetros portátiles de rayos X y de rayos gamma o espectrómetros portátiles acoplados a un láser LIBS (Laser Induced Based Spectoscopy) (figura 7a). Estos dispositivos son usados para obtener una información más rápida que permite determinar guías para identificar de forma directa, desde el trabajo de campo, zonas con concentraciones altas de distintos elementos, por ejemplo: litio, uranio, potasio, metales, entre muchos otros.

Los dispositivos tipo LIBS se usan como guías de exploración, pues permiten hacer análisis cuantitativos y cualitativos y mapeos elementales a escala milimétrica incluso de elementos ligeros —como el litio—, además de que brindan información en tiempo real y a bajo costo en comparación con los métodos de laboratorio (Harmon et al., 2019; Bellie et al., 2021; Wise et al., 2022).

El resultado de estas actividades es la identificación de las zonas, niveles estratigráficos, edades y minerales que presentan una concentración anómala de los elementos de interés.

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y GEOQUÍMICA

Una vez que se conocen las áreas y rocas de interés, con base en sus características litológicas, concentraciones de metales, posición estratigráfica

y estructuras geológicas regionales que las afectan; se desarrollan estudios más especializados para identificar los minerales que contienen los elementos de interés, así como las condiciones de su formación.

Algunas de las metodologías más utilizadas para determinar las características mencionadas son:

1. Observaciones –bajo un microscopio denominado petrográfico– de láminas delgadas cortadas de una roca, con alrededor de 30 µm de espesor, adheridas a un portaobjetos de vidrio. Como las rocas están conformadas por un agregado de minerales con propiedades ópticas distintivas, cuando la luz los atraviesa en la lámina delgada, es posible identificar la mineralogía de una roca y clasificarla para efectos de formular hipótesis de origen y evolución de la zona en la que se trabaja. (figura 7b).

Figura 7. Equipos utilizados para la caracterización de rocas en el trabajo de exploración



Nota: *a*) Equipo portátil tipo *LIBS*. *b*) Microscopio petrográfico del Laboratorio de Geoquímica de Fluidos Corticales del Instituto de Geociencias, UNAM.
Fuente: elaboración propia.

2. Análisis de laboratorio. Las muestras de roca colectadas en el trabajo de campo se fragmentan y pulverizan para ser analizadas por distintos métodos en laboratorios especializados. En función del método, algunos materiales son digeridos con ácidos, otros son separados por grupos minerales, otros se montan en resinas epóxicas, etcétera. Algunos de estos métodos como la espectrometría de masas acoplada a un muestreo por medio de un láser (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. LA-ICP-MS) permiten determinar la composición química de materiales sólidos (Brenner, 2017) como minerales, vidrio, microfósiles, entre otros.

   Además, los datos obtenidos permiten interpretar las relaciones isotópicas que existen dentro de los materiales analizados para calcular, por ejemplo, el tiempo en el que se formaron o cristalizaron distintos tipos de roca. De igual manera permiten obtener las concentraciones de elementos del grupo de las tierras raras dentro de un cristal, importante para conocer las condiciones químicas en las que se formaron.

   Con esta información también es posible determinar el origen de las rocas ígneas y sedimentarias, condiciones de formación de magmas, los procesos magmáticos y metamórficos, entre otros.

3. Otros análisis utilizados en la exploración geológica de yacimientos minerales son la difracción de rayos X, la microscopía electrónica (*Scanning Electronic Microcopy*), análisis de espectrometría de masas de isótopos estables (isótopos de O, S y H, entre otros) y la datación de rocas por medio de isótopos de AR y K (métodos K/Ar y Ar/Ar).

REGIONES PROSPECTIVAS PARA SER EXPLORADAS POR LITIO

ASIGNACIONES, CONCESIONES Y PROYECTOS MINEROS DE LITIO EN MÉXICO

Para definir claramente algunos conceptos usados en textos distintos referidos al tema de minería, en este apartado se presenta una explicación de los conceptos de concesión y asignación minera. De acuerdo con la Secretaría de Economía (SE) una concesión minera se refiere al conjunto de derechos y obligaciones que otorga el Estado –materializado en un título– y que confiere a una persona natural, jurídica o al propio Estado la facultad para desarrollar las actividades de exploración y explotación del área o terreno solicitado, por un periodo de 50 años. La reforma a Ley Minera en el 2023 determina que a partir de su promulgación no se concederán nuevas concesiones mineras.

Una asignación minera se refiere a una concesión otorgada de forma exclusiva por el Estado mexicano al Servicio Geológico Mexicano (SGM), para explotar y evaluar una superficie donde se presume la existencia de uno o varios depósitos minerales. A diferencia de las concesiones, las asignaciones mineras tienen una temporalidad de seis años (Witker-Velásquez, 2019).

Los derechos y obligaciones declaradas para las concesiones y asignaciones mineras se rigen por la Ley Minera y son otorgadas por la Secretaría de Economía.

Otro concepto utilizado en la Ley Minera es el de *zona de reserva minera*, que se define como el espacio geográfico territorial en el cual existe una serie o conjunto de recursos —minerales, gaseosos, líquidos— física y relativamente disponibles y que de una forma viable en términos económicos con

la tecnología actual o futura sirven o servirán para satisfacer las necesidades humanas o para llevar a cabo una actividad. Dicho de otra manera, el Estado mexicano puede reservarse zonas de cualquier extensión en el territorio nacional, mar territorial y plataforma continental en las que el aprovechamiento de uno o varios yacimientos minerales y demás recursos geológicos pueda tener especial interés para el desarrollo económico y social o para la defensa nacional (Witker-Velásquez, 2019).

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO

El Servicio Geológico Mexicano (SGM) es la institución encargada de generar información geológica a lo largo de todo el territorio nacional. La mayoría de la información generada se encuentra disponible en su sitio web, en el que se puede observar que el trabajo de cartografía geológica a detalle de la institución cubre alrededor del 100% a una escala 1:250000 y del 50% del país a escala 1:50000.

Desde 2021, el SGM puso en marcha un plan de exploración geológica en distintas regiones de México para ubicar depósitos de litio. Al inicio se plantearon como objetivo 82 localidades definidas por la misma institución como zonas con potencial para exploración en función de las características geológicas, información bibliográfica disponible y el vasto acervo geológico generado por el SGM durante las últimas décadas.

Con base en los avances en el trabajo de campo realizado hasta 2023, el SGM ha analizado más de 3000 muestras colectadas de más de 200 zonas distribuidas en los estados de Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas. Hasta finales de 2023 el SGM ha obtenido avances significativos en la exploración regional por litio y se han detectado algunas asignaciones mineras en el estado de Sonora.

Por su carácter confidencial, la información específica se encuentra resguardada por el SGM. Sin embargo, vale la pena mencionar el arduo

trabajo enfocado a localizar y caracterizar las posibles anomalías de litio. Como parte de la información generada se encuentran análisis de laboratorio de las concentraciones de distintos elementos químicos —Aluminio (Al), Arsénico (As), Boro (B), Bario (Ba), Berilio (Be), Calcio (Ca), Fierro (Fe), Potasio (K), Litio (Li), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Sodio (Na), Niobio (Nb), Fósforo (P), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr), Tántalo (Ta) y Zinc (Zn)— que acompaña al trabajo cartográfico de las zonas evaluadas hasta la fecha.

Figura 8. Mapa geológico de México en el que se muestra la distribución de los principales tipos de roca que conforman las principales provincias geológicas



Nota: el mapa contiene las 82 localidades por explorar por parte del SGM y las concentraciones de litio reportadas en los anexos a excepción de datos de los estados de Puebla y Oaxaca, ya que las concentraciones de litio reportadas son menores a 100 PPM.
Fuente: la base geológica es una adaptación del *Atlas de México* del Instituto de Geografía de la UNAM (2007). La ubicación de las localidades se basa en el informe de la Red Mexicana de Afectadas/os por la Minería (REMA), 2024.

Con base en las tipologías de depósitos mencionadas anteriormente, en las que los contenidos anómalos de litio son del orden de 1 000 a 4 000 ppm –concentraciones de dos órdenes de magnitud por encima del valor promedio de la corteza terrestre–, el SGM ha determinado concentraciones de litio tanto en pegmatitas, como en tobas –rocas volcánicas de grano fino conformadas por un agregado de ceniza y fragmentos líticos– y sedimentos de grano fino en ambientes lacustres en cuencas y fosas tectónicas continentales.

En la figura 8 se muestran las 82 localidades estudiadas al inicio por el SGM, las cuales se encuentran distribuidas sobre todo en la provincia de la Sierra Madre Occidental y en menor medida en la Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre Oriental, la Mesa Central y el oriente de la Sierra Madre del Sur.

CASO DE ESTUDIO "LA VENTANA", MUNICIPIO DE BACADÉHUACHI, SONORA

Estado de las concesiones

La región con mayor relevancia respecto a depósitos de litio en México se encuentra al sur del municipio de Bacadéhuachi, en la porción centro-oriental del estado de Sonora (figura 9).

En la región existen siete concesiones otorgadas en un inicio a las empresas Bacanora Minerals, Candence Minerals y Rare Earth Minerals con los nombres de Sonora Lithium, Buenavista y La Ventana (Sistema Integral sobre Economía Minera, [SIEM]). En 2022 estas concesiones pasaron a ser propiedad de la empresa Ganfeng Lithium Co. En la actualidad se denomina al conjunto de nueve concesiones como S*onora Lithium Project*, las cuales se encuentran vigentes hasta el 2060 y 2065 (Secretaría de Economía). Las concesiones denominadas La Ventana, El Sauz y Fleur representan junto con la región de La Salada –límite de los estados de Zacatecas y San Luis Potosí–, las únicas con reservas certificadas en

México; en el caso de Sonora con un total de reservas probadas y probables de 1 666 y 849 toneladas de carbonato de litio equivalente, respectivamente y en el caso de La Salada un total de recursos inferidos de 12 Mt con un grado del 4.6% de potasio y 380 PPM de litio (SRK Consulting, 2019).

De acuerdo con Bacanora Lithium, se implementaría una operación a cielo abierto que tendría una vida de alrededor de 19 años dividida en dos fases, en las que se planeaba producir 17 500 toneladas por año (t/a) de carbonato de litio (Li_2Co_3) de grado de baterías en la primer fase y 35 000 toneladas de Li_2Co_3 en la segunda. Además, al mismo tiempo se planeaba producir 28 000 t/a de sulfato de potasio para la industria de fertilizantes.

En el presente, el área que comprenden las concesiones del proyecto Sonora Lithium se encuentra dentro de la Zona Reserva Minera de Litio Li-Mx 1 (véase Acciones del Gobierno Mexicano) y aunque las concesiones se encuentran vigentes, el proyecto no se encuentra en producción activa.

Características geológicas

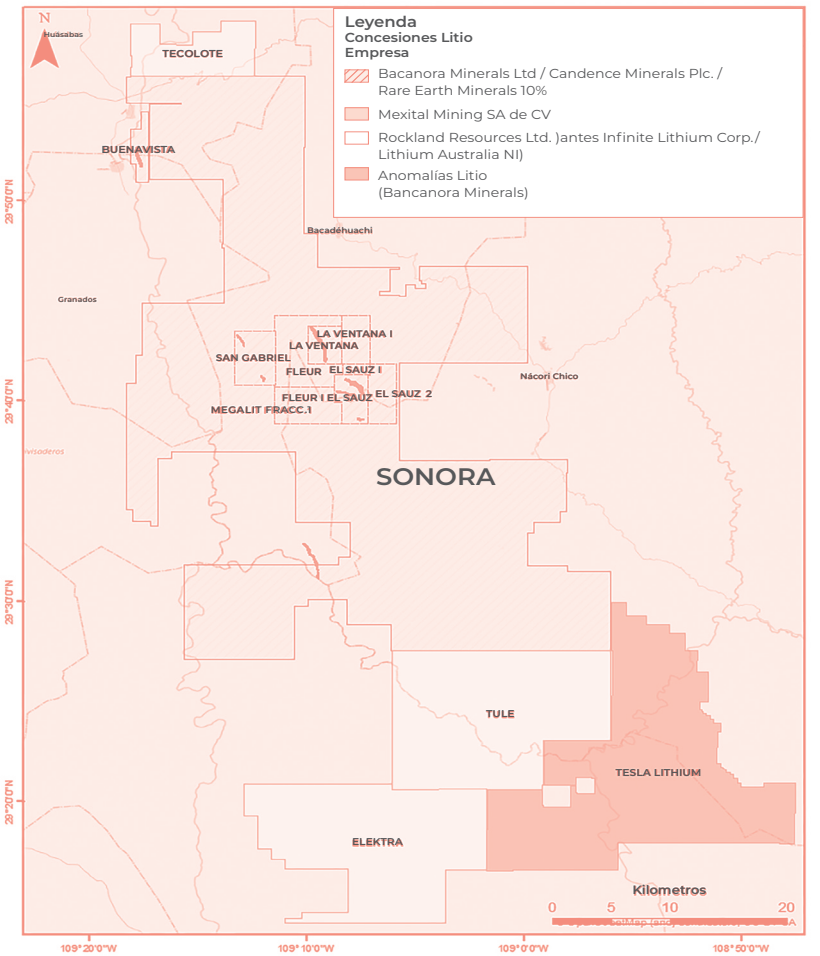
El yacimiento de Bacadéhuachi se encuentra dentro de la tipología asociada a horizontes de arcillas, areniscas y tobas depositados en cuencas continentales restringidas. A escala regional, estos depósitos forman parte de la evolución geológica de la SMO y la subprovincia de sierras y cuencas. A nivel local, en la región afloran distintas unidades litológicas, la mayoría de las cuales tiene un origen vulcanosedimentario; de la más antigua a la más joven son: *1*) rocas de origen sedimentario depositadas durante el Cretácico Tardío-Paleoceno; *2*) rocas volcánicas y piroclásticas de composición riolítica emplazadas durante el Oligoceno; *3*) derrames de lava basáltica; *4*) sucesiones sedimentarias de ambientes fluviales y aluviales (Formación Báucarit; King, 1939) depositadas desde el Oligoceno hasta el Mioceno temprano, y *5*) sucesiones sedimentarias pliocuaternarias (SGM, 2018; González-León y Moreno-Hurtado, 2021).

Los estratos mineralizados conforman dos unidades litológicas de sedimentos arcillo-arenosos tobáceos —erosión de depósitos de ceniza volcánica— que se encuentran separadas por una capa de ignimbrita. Estas rocas fueron depositadas en un ambiente fluvio-lacustre en donde los sedimentos se intercalan con los eventos volcánicos —representados por rocas de origen piroclástico ricas en ceniza, o tobas. La sucesión mineralizada está cubierta por flujos de andesita basáltica y, a su vez, descansa sobre lavas y corrientes de andesita y basalto, conjunto que se encuentra basculado (inclinado) con unos 25 grados hacia el oriente, lo que demuestra una etapa de esfuerzos de extensión posteriores al vulcanismo y el relleno de la cuenca. La mineralización ocurre principalmente en niveles estratiformes ricos en arcillas —p. ej. polilitionita— (SRK Consulting, 20015; Ausenco, 2018) (figura 10).

Las dos unidades mineralizadas tienen espesores de 20 a 40 m –unidad de arcilla inferior, por debajo de la capa de ignimbrita– y de 22 a 70 m –unidad de arcilla superior, por encima de la capa de ignimbrita. La ignimbrita intercalada entre las dos unidades tiene un espesor de 6 m. Cada unidad consiste en varias subunidades compuestas por rocas siliciclásticas —areniscas, limolitas y conglomerados—, sedimentos tobáceos, tobas de lapilli y tobas retrabajadas. Estas rocas afloran con una orientación norte-sur y se encuentran basculadas —inclinadas— hacia el noreste con unos 25 grados debido a la actividad de las fallas, las cuales muestran evidencia de desplazamiento oblicuo con la misma dirección (SRK Consulting, 2015; Verley, 2014).

El contenido de litio es mayor en la unidad inferior: > 4 000 ppm de litio. El origen de la mineralización no ha sido definido con claridad, pero se ha interpretado que se debe a la combinación de eventos de erosión de rocas alcalinas ricas en litio, erosionadas para formar sedimentos que se depositaron en un ambiente fluvio-lacustre y a la interacción de fluidos magmáticos que propiciaron la recirculación de metales y el posterior enriquecimiento de litio en sedimentos terrígenos. Las fallas que delimitan la cuenca tectónica juegan un papel importante en la circulación de los fluidos que favorecieron la mineralización (SRK Consulting, 2015; Verley, 2014; Ausenco, 2018).

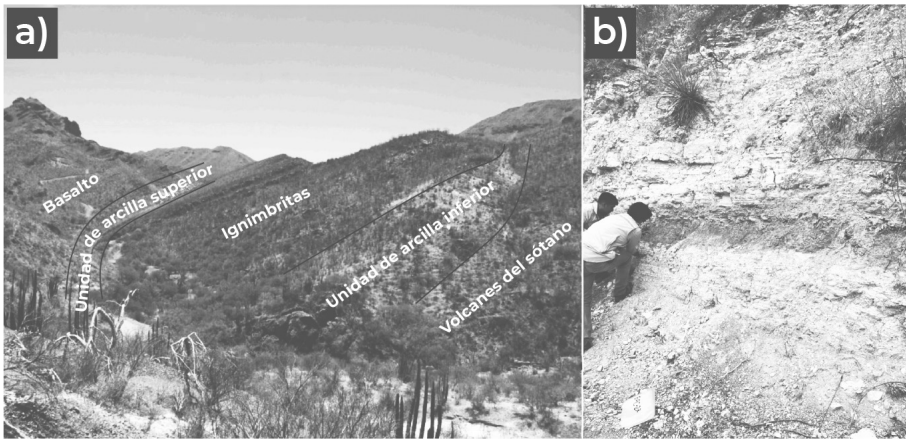
Figura 9. Mapa de localización de concesiones alrededor del municipio de Bacadéhuachi



Nota: Sólo las concesiones propiedad de la empresa Bacanora Lithium se encuentran vigentes.
Fuente: los polígonos de las concesiones usados en este mapa fueron tomados del sitio web de Geocomunes.[2] Las zonas marcadas como anomalías de litio fueron tomadas del reporte de factibilidad de la empresa Ausenco (2018).

[2] En http://132.248.26.105/catalogue/#/?q=3.1.1&d=368%3Bdataset

Figura 10. Depósito de litio de La Ventana, en el municipio de Bacadéhuachi, Sonora



Nota: *a*) Vista panorámica en la que se observan las unidades litológicas que conforman el depósito, las cuales se encuentran basculadas hacia el este. Modificada de Verley y colaboradores (2012). *b*) Vista de afloramiento de la Unidad de Arcillas Superior, en donde se observan intercalaciones de estratos de origen vulcanosedimentario de la Unidad Superior (recuadro rojo en figura a).
Fuente: *a*) Verley y colaboradores (2012). *b*) Tomada por Juan Carlos Castillo.

ACCIONES DEL GOBIERNO MEXICANO

LEY MINERA Y DECRETOS DE LITIO

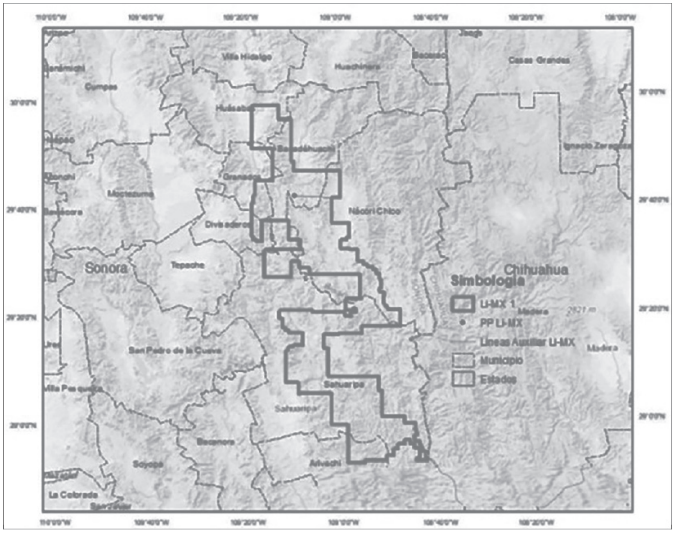
En 2022 y 2023 se propusieron y aprobaron reformas a la Ley Minera. Parte de estas reformas se presentan como decretos relacionados a la minería y recursos minerales de litio. Los decretos, publicados en 2022 y 2023 en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF: 23 de agosto de 2022, 18 de febrero de 2023 y 17 de marzo de 2023), establecen los siguientes puntos principales:

1. Toda actividad de exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento de minerales de litio quedan a cargo del Estado y se

declaró de utilidad pública al litio, por lo que el Gobierno mexicano no otorgará concesiones, licencias, contratos, permisos o autorizaciones en materia de yacimientos de litio.

2. Se creó un organismo público descentralizado que será el encargado de la administración de las cadenas de valor del litio al cual se le llamó "Litio para México". Como parte de este decreto se estableció al Servicio Geológico Mexicano como la principal institución encargada de hacer exploración por litio en el territorio mexicano y que la información que genere será la base de la localización y definición de blancos de exploración y producción de litio.
3. Se designó a la región que comprende los municipios de Arivechi, Bacadéhuachi, Huásabas, Divisadero, Granados, Sahuaripa y Nácori Chico como zona de reserva minera de litio, denominada como "Li-MX-1". Esta región ocupa una superficie de 234 955.1980 hectáreas (figura 11).

Figura 11. Polígono que delimita la zona de reserva minera de litio Li-MX-1



Fuente: *Diario Oficial de la Federación* publicado el 18 de febrero de 2023.

Otra de las acciones importantes del Gobierno mexicano es el Plan Sonora, un proyecto que tiene como objetivo el desarrollo sostenible en la región y la implementación del uso de fuentes de energías renovables. Dado que los depósitos más importantes de litio conocidos en México se encuentran en el estado de Sonora, este proyecto incluye la extracción de litio entre sus objetivos, además de crear la planta fotovoltaica más grande de América Latina.

PROYECTO DE EXPLORACIÓN CONAHCYT-UNAM

El Conahcyt como institución promotora de la investigación científica y del desarrollo tecnológico en México, inició en 2023 la implementación de proyectos enfocados en el desarrollo de conocimiento sobre las principales áreas de la cadena de valor de litio, de la cual este capítulo sólo trata la fase inicial —la exploración y prospección—. En este apartado se presentan las generalidades de un proyecto de exploración regional de depósitos de litio financiado por el Conahcyt con el fin de definir con bases científicas estrategias de exploración de yacimientos de litio asociados a arcillas en el estado de Sonora. Las subsecuentes fases de la cadena de valor serán abordadas en los siguientes capítulos.

La base del desarrollo minero de cualquier metal o no metal inicia con la exploración y prospección regional de áreas de interés que, por sus características geológicas pueden ser áreas con importantes concentraciones anómalas de distintos minerales o elementos químicos. Para apoyar las acciones y objetivos del Gobierno para desarrollar la soberanía de las cadenas de valor de litio, el Conahcyt se ha complementado con investigadores del Instituto de Geociencias de la UNAM y con personal del Servicio Geológico Mexicano para desarrollar un proyecto que inició en el segundo trimestre de 2023 con el objetivo de establecer guías de exploración geológica.

Los alcances del proyecto se basan en el reconocimiento geológico de áreas cuya evolución geológica documentada representa el

establecimiento de potenciales blancos de exploración además de un exhaustivo análisis con técnicas analíticas de rocas y minerales para determinar el origen, ocurrencia y distribución geográfica de las principales anomalías de litio. Lo anterior siguiendo las metodologías descritas.

A continuación, se presenta una síntesis de los resultados alcanzados a través de este proyecto y sólo se exhiben de manera general debido a que la información generada es de uso reservado y de carácter confidencial.

Regiones exploradas en el estado de Sonora

La evolución tectónica del territorio del estado de Sonora, durante la era Cenozoica, propició la formación de cuencas continentales con depósitos volcánicos asociados. A lo largo de la porción oriental del estado de Sonora existen varias cuencas continentales en las que se han reportado depósitos vulcanosedimentarios en cuencas donde existieron paleo-lagos y que, de acuerdo con sus características geológicas, se interpretan como cuencas que fueron cerradas al menos de forma temporal; este contexto es propicio para la formación de sucesiones vulcanosedimentarias enriquecidas en litio (p. ej. Bowell et al., 2020). Los depósitos localizados al sur de Bacadéhuachi —concesiones La Ventana, Fleur, El Sauz, entre otros— forman parte de este sistema de cuencas continentales.

Con base en la declaración de la Zona de Reserva Minera del Litio en Sonora, el proyecto de exploración regional ha centrado el reconocimiento geológico de las áreas que comprenden esta zona entre las regiones de Granados y Bacadéhuachi y Sahuaripa (figura 11). Además, se han reconocido otras regiones al norte del estado de Sonora, donde también se encuentran cuencas con características geológicas que permiten inferir posibles depósitos con altos contenidos de litio.

Avances en la caracterización de los depósitos de litio asociados a estratos de arenas y arcillas

Con base en la información generada en 2023, parte del proyecto de Conahcyt, el SGM y la proveniente de otros depósitos alrededor del mundo, el equipo de personas investigadoras que participaron en el proyecto de exploración se lograron avances significativos en el conocimiento de los sistemas complejos de los depósitos asociados a arcillas de Sonora. Por el carácter de mineral crítico y lo referido a los nuevos decretos en la reforma a la ley minera, los resultados puntuales son confidenciales. Sin embargo, se pueden presentar de manera general algunas consideraciones de los depósitos de litio en Sonora:

1. Son eminentemente estratiformes en columnas de rocas vulcanosedimentarias depositadas en ambientes de baja energía como paleo-lagos, depósitos aluviales y fluviales –en las facies de sedimentos finos–.
2. Las arcillas enriquecidas en litio son el producto de la lixiviación y erosión de rocas volcánicas de grano fino (tobas) y de la circulación de fluidos al interior de las cuencas continentales.
3. Las cuencas con depósitos enriquecidos en litio tienen una estratigrafía compleja, lo cual genera que las concentraciones sean variables y distribuidas de manera heterogénea.
4. La distribución geográfica de los depósitos reconocidos está controlada por sistemas de fallas geológicas que limitan y segmentan los depósitos, por lo que los depósitos no son continuos en términos espaciales.

El resultado global de este proyecto es un modelo genético que explica la formación de depósitos de litio asociados a estratos de arcillas en cuencas continentales del estado de Sonora y que servirá como base para la exploración a mayor detalle de distintos prospectos. En un futuro

cercano, los avances en la investigación de estos depósitos permitirán establecer guías de exploración para optimizar recursos y la caracterización de depósitos de litio en Sonora y otras partes de México, así como para la cuantificación de recursos.

PERFILES DE TALENTO ESPECIALIZADO PARA LA EXPLORACIÓN DE DEPÓSITOS DE LITIO

Los retos que implican la exploración regional por yacimientos de litio en México, así como la caracterización de las unidades litológicas enriquecidas en este metal requiere de profesionales con conocimientos especializados en geología regional, caracterización de rocas y minerales y minería.

En la tabla 6 se presenta una propuesta de la preparación académica, habilidades y conocimientos requeridos para la exploración y prospección de depósitos/yacimientos de litio en México.

Tabla 6. Perfiles de talento especializado necesarios para la exploración y prospección de depósitos de litio

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS RELACIONADOS	HABILIDADES
Perfil profesional-licenciatura o ingeniería	Licenciatura en geología Ingeniería geológica Licenciatura en geociencias	Petrología ígnea y sedimentaria. Cartografía geológica. Petrografía	Manejos de sistemas de información geológica. Trabajo de campo en zonas de difícil acceso. Muestreo sistemático en zonas de difícil acceso. Manejo de mapas, toma de datos estructurales, descripciones litoestratigráficas Caracterización de muestras de roca-blogueo de núcleos de perforación, descripción petrográfica de minerales de alteración, entre otros
	Licenciatura en geografía	Cartografía, uso de sistemas de información geográfica	Manejo avanzado de sistemas de información geográfica

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS RELACIONADOS	HABILIDADES
Perfil profesional-licenciatura o ingeniería	Ingeniería ambiental	Evaluación y gestión de impactos ambientales	Elaboración de planes para minimizar impacto ambiental y supervisión del cumplimiento de la normatividad en términos de exploración y explotación de minerales
	Ingeniería de minas	Diseño y construcción de obras mineras	Innovación en diseño de obras mineras modernas con vista al cuidado del medio ambiente
Especialidad-Maestría-Doctorado	Análisis de cuencas	Evolución de cuencas continentales	Trabajo de campo enfocado a la identificación de depósitos con anomalías metálicas, trabajo multidisciplinario, conducción de vehículos en terrenos de difícil acceso
	Yacimientos minerales (litio y otros minerales críticos/ estratégicos)	Yacimientos minerales de litio y otros metales en distintos ambientes geológicos, geología estructural de sistemas de fallas complejos y polimodales, geología regional de México, evaluación y cuantificación de recursos minerales	
	Mineralogía y técnicas analíticas	Conocimientos técnicos de manejo de equipos especializados (p. ej. espectroscopia y espectrometría de masas)	
	Geología estructural de ambientes extensionales	Reconocimiento e interpretación de estructuras geológicas	
	Geología ambiental	Diagnóstico de obras mineras para el manejo responsable de recursos naturales	Trabajo de campo, análisis de información relacionada al medio ambiente, innovación en metodologías y procesos en el ámbito minero con altos estándares de cuidado al medio ambiente
	Ciencia de datos	Manejo de grandes bases de datos	Interpretación de grandes bases de datos con el fin de optimizar procesos de evaluación de recursos

Fuente: elaboración propia

CONSIDERACIONES FINALES

El litio ha emergido como uno de los minerales críticos de mayor relevancia internacional en los últimos años debido a su uso esencial en la fabricación de baterías. Sin embargo, a pesar de que las reservas de litio están identificadas en 24 países, sólo cuatro (Argentina, Australia, China y Chile) producen cantidades significativas. En el caso de México, aunque posee reservas confirmadas, aún se encuentra en etapa de exploración. Este panorama ha generado un incremento en la exploración global durante la última década, impulsado por la alta demanda y el aumento en los precios del litio.

Las concentraciones naturales de litio en la corteza terrestre son bajas, variando entre 1.5 y 24 ppm. Sólo algunas regiones cuentan con depósitos con concentraciones económicamente viables para su explotación, lo cual depende de diversos factores geológicos como la diferenciación magmática y los procesos hidrotermales. El producto de la superposición de estas variables geológicas da lugar a los yacimientos de litio, que se clasifican principalmente en tres tipos: pegmatitas, salmueras en salares y estratos de arcillas en sucesiones vulcanosedimentarias continentales. Cada uno de estos tipos tiene características geológicas distintivas y presenta desafíos únicos para su exploración y explotación.

Los proyectos de investigación impulsados por el Conahcyt son pasos importantes hacia el aprovechamiento eficiente de este recurso estratégico, con la posibilidad de posicionar a México como un actor con capacidades soberanas para su aprovechamiento que nos lleve a ser un actor relevante en el mercado global del litio y a la vanguardia de la investigación científica de los complejos yacimientos de litio. El enfoque se ha dirigido principalmente a las cuencas continentales de Sonora y otras regiones de México con contextos geológicos similares a los de los yacimientos reconocidos a nivel mundial, y donde se han identificado potenciales yacimientos de litio asociados principalmente a arcillas y rocas vulcanosedimentarias. La región de Bacadéhuachi, en Sonora, destaca

por tener reservas probadas y probables de litio, con concesiones vigentes, pero aún sin producción activa.

Con el fin de coadyuvar los esfuerzos del Gobierno en torno a la soberanía energética, el desarrollo de proyectos de exploración y explotación de litio en México requiere de una base científica sólida y la formación de talento especializado en geología regional, caracterización de rocas y minerales y minería. El éxito de estos proyectos no sólo depende de la identificación y caracterización de las reservas, sino también de la implementación de estrategias de exploración óptimas y el uso responsable de los recursos naturales.

Finalmente, la exploración y explotación del litio en México representan una oportunidad significativa para el desarrollo económico del país. La colaboración entre instituciones científicas y el gobierno es crucial para establecer una industria de litio sostenible y competitiva. Los proyectos de investigación impulsados por el Conahcyt son pasos importantes hacia el aprovechamiento eficiente de este recurso estratégico, con la posibilidad de posicionar a México como un actor relevante en el mercado global del litio y a la vanguardia de la investigación científica de los complejos yacimientos de litio. A futuro se espera que México cuente con yacimientos suficientemente caracterizados para avanzar a la etapa de producción.

REFERENCIAS

Alekseeva, L. P. y Alekseev, S. V. (2018). Industrial Groundwater of the Olenek Artesian Basin: Geochemistry and Development Prospects. *Water Resources 45*(1), 79–88. https://doi.org/10.1134/S0097807818010025/METRICS

Ausenco (2018). *Technical report on the feasibility study for the Sonora Lithium Project*

Bellie, V., Gokulraju, R., Rajasekar, C., Vinoth, S., Mohankumar, V. y Gunapriya, B. (2021). Laser induced Breakdown Spectroscopy for new product

development in mining industry. *Materials Today. Proceedings*, *45*(9), 8157–8161. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.02.459

Benson, T. R., Coble, M. A. y Dilles, J. H. (2023). Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones. *Science Advances*, *9*(35). https://doi.org/10.1126/SCIADV.ADH8183

Benson, T. R., Coble, M. A., Rytuba, J. J. y Mahood, G. A. (2017). Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*, *8*(1). https://doi.org/10.1038/S41467-017-00234-Y

Blake, R. (1974). *Extracting minerals from geothermal brines: a literature study.* U.S. Bureau of Mines.

Bowell, R. J., Lagos, L., de los Hoyos, C.R. y Declercq, J. (2020). Classification and Characteristics of Natural Lithium Resources. *Elements*, *16*(4), 259–264. https://doi.org/10.2138/GSELEMENTS.16.4.259

Brenan, J. M., Neroda, E., Lundstrom, C. C., Shaw, H. F., Rverson, F. J. y Phinney, D. L. (1998). Behaviour of boron, beryllium, and lithium during melting and crystallization: constraints from mineral-melt partitioning experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *62*(12), 2129–2141. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00131-8

Brenner, I. J. (2017). Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Applications. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 229–235. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803224-4.00057-1

Centeno-García, E. (2017). Mesozoic tectono-magmatic evolution of Mexico: An overview. *Ore Geology Reviews, 81*(3), 1035-1052, https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.010.

Cerny, P. (1991). Rare-element granitic pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. *Geoscience Canada*, *18*(2), 49–67.

Chan, L. H., Alt, J. C. y Teagle, D. A. H. (2002). Lithium and lithium isotope profiles through the upper oceanic crust: a study of seawater–basalt exchange at ODP Sites 504B and 896A. *Earth and Planetary Science Letters*, *201*(1), 187–201. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00707-0

Chen, C., Lee, C. T. A., Tang, M., Biddle, K. y Sun, W. (2020). Lithium systematics in global arc magmas and the importance of crustal thickening for

lithium enrichment. *Nat Commun*, *11*(5), 5313. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19106-z

Collins, A. G. (1975). Geochemistry of Oil Field Waters. *Developments in Petroleum Science*, *1*.

Connolly, C. A., Walter, L. M., Baadsgaard, H. y Longstaffe, F. J. (1990). Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada sedimentary Basin. I. Chemistry. *Applied Geochemistry*, 5(4), 375–395. https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90016-X

de Dinechin, D. M., Balcone-Boissard, H., Martel, C. y Rusiecka, M. (2023). Lithium in felsic magmas: a volcanological perspective. *Frontiers in Earth Science*, *11*, 1149020. https://doi.org/10.3389/FEART.2023.1149020

Dill, H. G. (2015). Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews*, *69*, 417–561. https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2015.02.022

Eberl, D. D., Farmer, V. C. y Barrer, R. M. (1984). Clay Mineral Formation and Transformation in Rocks and Soils [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, *311*(1517), 241–257.

Elders, W. A. y Cohen, L. H. (1983). The Salton Sea Geothermal Field, California, as a near-field natural analog of a radioactive waste repository in salt. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. https://doi.org/10.2172/5585044

Ellis, B. S., Szymanowski, D., Magna, T., Neukampf, J., Dohmen, R., Bachmann, O., Ulmer, P. y Guillong, M. (2018). Post-eruptive mobility of lithium in volcanic rocks. *Nature Communications*, *9*(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05688-2

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., López-Martínez, M. y Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115–152. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006

Garrett, D. E. (2004). Lithium: Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride. *Academic Press*, 1–235. https://doi.org/10.1016/B978-012276152-2/50037-2

González-León, C. M. y Moreno-Hurtado, G. S. (2021). Mapa geológico y base de datos geocronológicos de Sonora, México. *Terra Digitalis* (5), 1–7. https://doi.org/10.22201/IGG.25940694E.2021.1.76

Grew, E. S. (2020). The Minerals of Lithium. *Elements, 16*(4), 235–240. https://doi.org/10.2138/GSELEMENTS.16.4.235

Haddad, A. Z., Hackl, L., Akuzum, B., Pohlman, G., Magnan, J. F. y Kostecki, R. (2023). How to make lithium extraction cleaner, faster and cheaper – in six steps. *Nature*, *616*(7956), 245–248. https://doi.org/10.1038/d41586-023-00978-2

Harmon, R. S., Lawley, C. J. M., Watts, J., Harraden, C. L., Somers, A. M. y Hark, R. R. (2019). Laser-Induced Breakdown Spectroscopy—An Emerging Analytical Tool for Mineral Exploration. *Minerals*, *9*(12), 718. https://doi.org/10.3390/min9120718

Helbert, J., Hauber, E. y Reiss, D. (2015). Water on the Terrestrial Planets. *Treatise on Geophysics*, *10*, 367–409. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00174-3

Instituto de Geografía, UNAM. (2007). *Atlas de México.*

Kharaka, Y. K., Hanor, J. S. (2003). Deep Fluids in the Continents: I. Sedimentary Basins. *Treatise on Geochemistry*, *5*(9), 1–48. https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05085-4

King, R. (1939). Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico. *GSA Bulletin*, *50*(11), 1625–1722. https://doi.org/10.1130/GSAB-50-1625

Koopmans, L., Martins, T., Linnen, R., Gardiner, N., Breasley, C., Palin, R., Groat, L., Silva, D. y Robb, L. (2023). The formation of lithium-rich pegmatites through multi-stage melting. *Geology*, *52*(1) 7-11. https://doi.org/10.1130/G51633.1

Li, Q., Fan, Q., Wang, J., Qin, Z., Zhang, X., Wei, H., Du, Y. y Shan, F. (2019). Hydrochemistry, Distribution and Formation of Lithium-Rich Brines in Salt Lakes on the Qinghai-Tíbetan Plateau. *Minerals*, *9*(9), 528. https://doi.org/10.3390/MIN9090528

Li, Rui-q., Liu, Cheng-l., Jiao, Peng-ch. y Wang, Jiu-y. (2018). The tempo-spatial characteristics and forming mechanism of Lithium-rich brines in China. *China Geology, 1*(1), 72–83. https://doi.org/10.31035/CG2018009

Li, Y. L., Miao, W. L., He, M. Y., Li, C. Z., Gu, H. E. y Zhang, X. Y. (2023). Origin of lithium-rich salt lakes on the western Kunlun Mountains of the Tíbetan Plateau: Evidence from hydrogeochemistry and lithium isotopes. *Ore Geology Reviews, 155*. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105356

Ling, K., Wen, H., Han, T., Lu, Z., Cui, Y., Luo, C. y Yu, W. (2023). Lithium-rich claystone in Pingguo area, Guangxi, Southwest China: precursor kaolinite controls lithium enrichment. *Mineralium Deposita*. https://doi.org/10.1007/s00126-023-01210-x

Lithium Americas (2022). *Feasibility study National instrument 43-101 technical report for the Thacker Pass Project*.

Liu, S., Li, Y., Liu, Jie, Ju, Y., Liu, Jianming, Yang, Z. y Shi, Y. (2018). Equilibrium lithium isotope fractionation in Li-bearing minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta, 235*, 360–375. https://doi.org/10.1016/J.GCA.2018.05.029

London, D. (2014). A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites: *Lithos, 184–187*, 74–104. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.025

London, D. (2008). Pegmatites. The Canadian Mineralogist. *American Mineralogist, 94*(5-6), 862-862

Mahood, G. y Hildreth, W. (1983). Large partition coefficients for trace elements in high-silica rhyolites. *Geochimica et Cosmochimica Acta, 47*(1), 11–30. https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90087-X

Merriman, R. J. (2005). Clay minerals and sedimentary basin history. *European Journal of Mineralogy, 17*(1), 7–20. https://doi.org/10.1127/0935-1221/2005/0017-0007

Meshram, P., Pandey, B. D. y Mankhand, T. R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy, 150*, 192–208. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012

Moldovanyi, E. P., Walter, L. M. y Land, L. S. (1993). Strontium, boron, oxygen, and hydrogen isotope geochemistry of brines from basal strata of the Gulf Coast

sedimentary basin, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *57*(9), 2083–2099. https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90095-E

Munk, L. A., Hynek, S. A., Bradley, D. C., Boutt, D., Labay, K. y Jochens, H. (2016). Lithium Brines: A Global Perspective. *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*. https://doi.org/10.5382/REV.18.14

Murray, H. H. (2007). *Applied clay mineralogy*. Elservier.

Neukampf, J., Ellis, B.S., Magna, T., Laurent, O. y Bachmann, O. (2019). Partitioning and isotopic fractionation of lithium in mineral phases of hot, dry rhyolites: The case of the Mesa Falls Tuff, Yellowstone. *Chemical Geology*, *506*, 175–186. https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2018.12.031

Neukampf, J., Ellis, B.S., Magna, T., Laurent, O. y Marrochi, Y. (2023). Partitioning and isotopic fractionation of lithium between mineral phases and alkaline to calc-alkaline melts of explosive and effusive eruptions. *Chemical Geology*, *636*, 121668

Ottolini, L., Laporte, D., Raffone, N., Devidal, J. L. y Fèvre, B. (2009). New experimental determination of Li and B partition coefficients during upper mantle partial melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, *157*(3), 313–325. https://doi.org/10.1007/S00410-008-0336-7/FIGURES/4

Red Mexicana de Afectadas/os por la Minería. (2023). *Explotación de litio en México ¿Interés público o extractivismo transnacional?* https://miningwatch.ca/sites/default/files/informelitioremamwc2023.pdf p.45-26

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth Sci Rev*, *63*(3–4), 249–293. https://doi.org/10.1016/s0012-8252(03)00037-0

Rudnick, R. L. y Gao, S. (2014). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, *3*, 1–51. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6

Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettenmaier, D., Jeandel, E. y Rombaut, A. (2022). Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources. *Geothermics*, *101*, 102385. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102385

Secretaría de Energía (Sener). Decreto por el que se crea el organismo público descentralizado denominado Litio para México. DOF:23/08/2022.

Secretaría de Economía (SE). Decreto por el que, por causa de utilidad pública, se declara zona de reserva minera de litio la denominada "Li-MX 1". DOF: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5680091&fecha=18/02/2023

Secretaria de Energía (Sener). Aviso mediante el cual se informa de la publicación del Estatuto Orgánico de Litio para México. *Diario Oficial de la Federación* DOF: 17/03/2023. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5683113&fecha=17/03/2023

Secretaria de Energía (Sener). Aviso General por el que se da a conocer el domicilio del Organismo Público Descentralizado denominado Litio para México. *Diario Oficial de la Federación* DOF: 17/03/2023. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.phpcodigo=5683114&fecha=17/03/2023

Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2018). Basuchi, H12-D26 escala 1:50,000. Estado de Sonora: https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/438_H12-D26_GM.pdf

Shouakar-Stash, O., Alexeev, S. V., Frape, S.K., Alexeeva, L.P. y Drimmie, R.J. (2007). Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes, of the deep groundwaters of the Siberian Platform, Russia. *Applied Geochemistry, 22*(3), 589–605. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.12.005

SRK Consulting (2015). *Mineral resource estimate update for the Sonora Lithium project*. 96 p.

SRK Consulting (2019). *NI43-101 Technical report on the Organimax salar sediment deposits, Mexico*. 110 p.

Stringfellow, W. T. y Dobson, P. F. (2021). Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. *Energies, 14*(20), 6805. https://doi.org/10.3390/EN14206805

Stueber, A. M., Walter, L. M., Huston, T. J. y Pushkar, P. (1993). Formation waters from Mississippian-Pennsylvanian reservoirs, Illinois basin, usa: Chemical and isotopic constraints on evolution and

migration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *57*(4), 763–784. https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90167-U

Tabarés, F. L. (2013). *Lithium: technology, performance and safety*. 295 p.

Toba, A. L., Nguyen, R. T., Cole, C., Neupane, G. y Paranthaman, M. P. (2021). U. S. lithium resources from geothermal and extraction feasibility. *Idaho National Laboratory, https://www.osti.gov/servlets/purl/1769065*

U. S. Geological Survey (2024). *Mineral commodity summaries* 2023.

Verley, C. (2014). *Updated and reclassified lithium resources, Sonora Lithium Project*.

Verley, C. G., E. McNeill y M. F. Vidal. (2012). *Report on the Sonora Lithium Project: SEDAR filed NI 43-101 technical report for Bacanora Minerals Ltd*.

Werner, H. H. (1970). Contribution to the mineral extraction from supersaturated geothermal brines Salton Sea Area, California. *Geothermics 2*(2), 1651–1655. https://doi.org/10.1016/0375-6505(70)90492-X

Williams, A. E., McKibben, M. A. (1989). A brine interface in the Salton Sea Geothermal System, California: Fluid geochemical and isotopic characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *53*(8), 1905–1920. https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90312-8

Williams, L. B. y Hervig, R. L. (2005). Lithium and boron isotopes in illite-smectite: The importance of crystal size. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *69*(24), 5705–5716. https://doi.org/10.1016/J.GCA.2005.08.005

Wilson, T. P. y Long, D. T. (1993). Geochemistry and isotope chemistry of Michigan Basin brines: Devonian formations. *Applied Geochemistry*, *8*(1), 81–100. https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90058-O

Wise, M. A., Harmon, R.S., Curry, A., Jennings, M., Grimac, Z. y Khashchevskaya, D. (2022). Handheld LIBS for Li Exploration: An Example from the Carolina Tin-Spodumene Belt, USA. *Minerals*, *12*(1), 77. https://doi.org/10.3390/min12010077

Witker-Velásquez, J. (2019). *Derecho minero*,

Zhao, H., Wang, Y. y Cheng, H. (2023). Recent advances in lithium extraction from lithium-bearing clay minerals. *Hydrometallurgy*, *217*, 106025. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106025

3. Beneficio y metalurgia extractiva de productos de litio

RESUMEN Y MAPA DE RUTA

A raíz de la creciente demanda de litio como elemento estratégico para la transición a nuevas fuentes de energía, es de suma importancia garantizar el suministro soberano y confiable de este elemento, a fin de asegurar la disponibilidad necesaria para la atención del segmento de vehículos eléctricos que, como Gobierno, debe orientarse al transporte público, así como para el almacenamiento eficiente de energía generada por fuentes variables como la solar y la eólica.

La transición energética podría ser limitada por el riesgo de desabasto de suministro de materiales (Bingoto, et al., 2023; Kamran et al., 2023; Gielen, 2021). Por esta razón, es necesario identificar los procesos óptimos para la obtención de litio de los diferentes minerales presentes en la naturaleza, así como definir las rutas más eficientes para el aprovechamiento de los recursos, asegurando el menor impacto ambiental.

Dentro de la cadena de valor de litio, este capítulo se enfoca en su etapa de beneficio y metalurgia extractiva. En tal sentido, se presenta una revisión de las tecnologías disponibles para los procesos de extracción de los minerales que contienen litio en el mundo; se ofrece un mayor grado de detalle sobre la extracción de minerales provenientes de yacimientos en México, donde se identifican acciones específicas para alcanzar

el desarrollo industrial soberano de la cadena de valor de litio en el país. Se describen los avances y el desarrollo tecnológico en materia de metalurgia extractiva de litio en México, en específico para la extracción de litio de arcillas —el tipo de yacimiento más abundante en México—, a la luz de los beneficios que esto puede reportar a la nación. Es importante mencionar que México tiene la oportunidad de ser pionero en el diseño de rutas de extracción de litio de arcillas, ya que no existen procesos comerciales de extracción de litio de este tipo de minerales a nivel mundial.

Figura 1. Mapa de ruta del proyecto de beneficio y metalurgia extractiva de litio



Fuente: elaboración propia.

MAPA DE RUTA

En la figura 1 se muestra el mapa de ruta de la etapa de beneficio y metalurgia extractiva dentro de la cadena de valor de litio, donde se indican

las acciones propuestas para alcanzar el objetivo de producir compuestos de litio de alto valor a partir de minerales de México a nivel industrial.

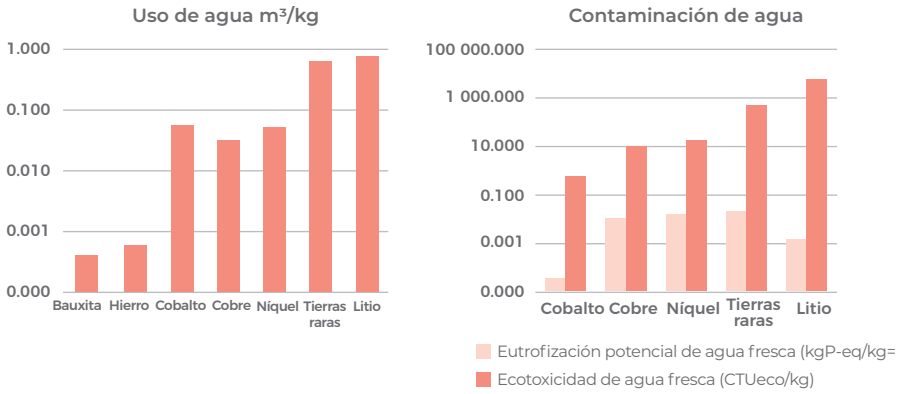
INTRODUCCIÓN

En la naturaleza, la mayoría de los metales se encuentran asociados químicamente con otros elementos, formando compuestos conocidos como minerales, por lo que se requiere una serie de procesos para separar el metal de interés del mineral que lo contiene. Para ello, la metalurgia define los procesos para extraer metales de sus minerales, refinarlos y prepararlos para su uso. El proceso consiste en modificar la naturaleza química de los minerales para separar el metal de sus compuestos sulfúricos, óxidos, silicatos o carbonatos. Estos métodos dependen mucho del tipo de mineral y de su composición química.

Como elemento fundamental de la cadena de valor de litio, el eslabón correspondiente al beneficio y metalurgia extractiva tiene como objetivo definir las rutas para la obtención de compuestos de litio de alto valor (carbonatos e hidróxidos) de la manera más eficiente, segura y con menor impacto ambiental, como materia prima para la fabricación de baterías de ion litio (BIL).

La transición del uso de combustibles fósiles a fuentes de energía renovable requiere de manera inicial la fabricación de una gran cantidad de elementos y dispositivos para la generación y almacenamiento de esta energía (incluyendo baterías), lo que implica la explotación de recursos naturales mediante actividades mineras y de construcción; la alteración de ecosistemas y los altos consumos de agua son algunos de los impactos ambientales que se pueden presentar. Un estudio realizado por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés, 2022) muestra que la extracción de minerales de litio y tierras raras —ambos usados en la fabricación de baterías— demanda una alta cantidad de agua, por lo que se trata de procesos propensos a contaminar y desbalancear los recursos acuíferos, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Indicadores de uso y contaminación de agua para extracción de materiales



Fuente: International Energy Agency (2022).

Debido a la necesidad de producir los materiales necesarios para la transición energética y otras aplicaciones, es importante definir los procesos extractivos más eficientes, con menor impacto ambiental y menor consumo de recursos naturales.

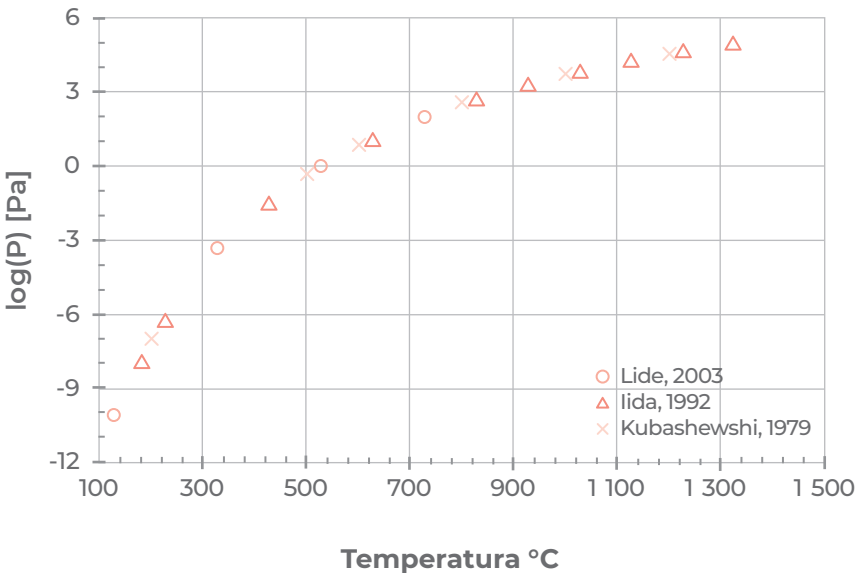
GENERALIDADES DEL LITIO

Para definir las rutas extractivas más eficientes de compuestos de litio de minerales que lo contienen, es importante conocer sus propiedades físicas y químicas, ya que de éstas depende su interacción con otros elementos y los respectivos procesos para separarlos de minerales e impurezas.

El litio es el tercer elemento en la tabla periódica, es un elemento metálico y el primero de los elementos alcalinos. Tiene una masa atómica de 6.94 g/mol y una configuración electrónica $[He]2s^1$. Otras de sus características son: punto de fusión 180.5 °C (454.3 K); punto de ebullición 1342 °C (1,615 K); densidad 534 kg/m³. Como se muestra en la figura 3, tiene una presión de vapor muy baja a temperatura ambiente, la cual incrementa con la temperatura (Lide, 2003; Lida et al., 1992;

Kubaschewski et al., 1983). Además, el litio tiene un calor específico de 3582 J/kg/K, electronegatividad en escala Pauling de 0.98, radio atómico de 1.82 Å y radio covalente de 1.30 Å.

Figura 3. Presión parcial del litio en función de la temperatura



Fuente: elaboración propia con base en Lide (2003), Lida y colaboradores (1992), así como Kubaschewski y colaboradores (1983).

En la tabla 1 se comparan algunas propiedades químicas del litio, sodio y potasio.

Tabla 1. Algunas propiedades químicas del litio, sodio y potasio

PROPIEDAD	LI	NA	K
Masa atómica [g/mol]	6.94	22.99	39.09
Calor de formación de moléculas a partir de átomos [kJ/mole]	-113.8	-76.9	-52.7
Afinidad electrónica [kJ]	8.65×10^{-23}	1.19×10^{-22}	1.12×10^{-22}

PROPIEDAD	LI	NA	K
Electronegatividad	1.0	0.9	0.8
Potencial normal de electrodo [V]	3.038	2.710	2.920
Radio iónico [Å]	0.68	0.97	1.33
Radio covalente [Å]	1.58	1.92	2.38
Distancia internuclear en molécula [Å]	2.67	3.08	3.91

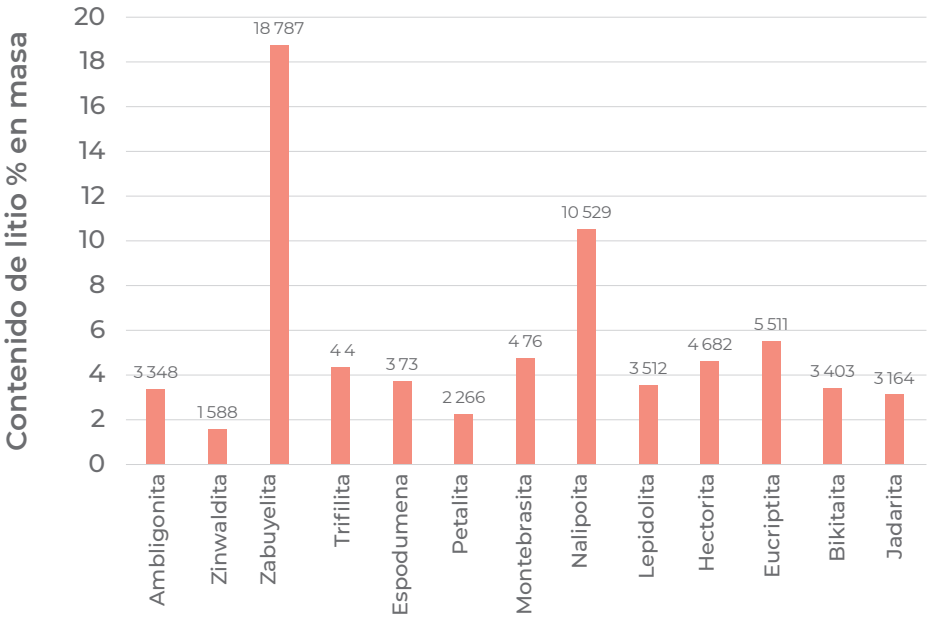
Fuente: Garret (2004).

Debido a sus propiedades, el litio reacciona con facilidad con el cloro, flúor y yodo para formar sus respectivas sales. Además, reacciona espontáneamente con el oxígeno o cualquier sal con oxígeno, como el hidróxido o el carbonato. Por esta razón es que se tienen registradas en bases de datos cerca de 75 especies minerales que contienen litio en la naturaleza (HSC Chemistry, 2021), de las cuales las principales se muestran en la tabla 2.

En la figura 4 se presenta la cantidad de litio que contienen las especies minerales mostradas en la tabla 2. La zabuyelita es la especie que tiene mayor cantidad de litio (18.8%), mientras que la espodumena y lepidolita contienen el 3.73 y el 3.51% en peso, respectivamente; estos dos minerales suelen encontrarse en depósitos de rocas ígneas tipo pegmatita. La hectorita es una arcilla del grupo de las esmectitas y contiene el 4.68% en peso de litio (concentración teórica; Meshram et al., 2014). Sin embargo, se ha encontrado que los depósitos reales de litio tienen menores concentraciones de este metal que las especies minerales mostradas en la tabla 2, cuyos valores típicos de contenido de litio se muestran en la última columna.

En los datos de la tabla 2 se observa que el oxígeno es el mayor constituyente de estas especies minerales, junto con elementos como el sodio y potasio. El silicio y el aluminio también están presentes en estas moléculas; lo anterior indica que el litio está ligado a silicatos, aluminatos o sílico-aluminatos, lo cual es de particular interés para el procesamiento de arcillas.

Figura 4. Contenido de litio en las principales especies minerales



Fuente: elaboración propia.

Para considerar las alternativas para la extracción de litio de las diferentes especies minerales indicadas en la tabla 2, es necesario revisar los datos de solubilidades en agua de las posibles sales que se podrían obtener del lixiviado de minerales con reactivos específicos. En la figura 5 se presentan los datos de las energías libres de formación (HSC Chemistry, 2021) de diversas sales alcalinas que se pueden obtener, así como la solubilidad de tales sales a temperatura ambiente y como función de la temperatura.

Tabla 2. Principales especies minerales que contienen litio

ESPECIES MINERALES	FÓRMULA QUÍMICA	ELEMENTO CONTENIDO [% MASA]						
		LI	AL	P	O	H	NA	F
Anbligonita	$(LiNa)AlPO_4(FOH)$	3.35	17.8	20.5	44.9	0.17	3.8	9.4
Zinnwaldita	$KLiFeAl(AlSi_3)O_{10}(OHF)_2$	1.59	12.4		38.4	0.12		6.5
Zabuyelita	Li_2CO_3	18.8			65.0			
Trifilita	$LiFe_2PO_4$	4.40		19.6	40.6			
Espodumena	$LiAl(SiO_3)_2$	3.73	14.5		51.6			
Petalita	$LiAlSi_4O_{10}$	2.27	8.8		52.2			
Montebrasita	$LiAl(PO_4)$ OH	4.76	18.5	21.2	54.8	0.69		
Nalipoita	$NaLi_2PO_4$	10.5		23.5	48.5		17.4	
Lepidolita	$K(LiAl)_3(AlSi)_4O_{10}(FOH)_2$	3.51	31.9		32.4	0.34		6.4
Hectorita	$Na_{0.3}(Mg\ Li)_3Si_4O_{10}(OH)_2$	4.68			43.2	0.45	1.6	8.6
Eucriptita	$LiAlSiO_4$	5.51	21.4		50.8			
Bikitaita	$LiAlSi_2O_6\ H_2O$	3.40	13.2		54.9	0.98		
Jadarita	$LiNaSiB_3O_7(OH)$	3.16			58.4	0.46	10.5	

Fuente: Meshram y colaboradores (2014) y HSC Chemistry (2021).

La figura 5a muestra la energía libre de Gibbs a 25°C para la formación de cloruros, fluoruros, ioduros, hidróxidos, carbonatos y sulfatos de litio, sodio y potasio, respectivamente; lo que permite validar la facilidad del litio para formar sales, las cuales se utilizarán para la fabricación de baterías. En cada caso, las sales de litio tienen los valores más negativos de energía libre de Gibbs, lo que significa que las sales de litio se formarán antes que las sales de potasio y sodio. Esto indica que es posible obtener carbonato de litio o sulfato a partir de cloruros o yoduros.

En la figura 5b se muestra la relación entre la energía libre de Gibbs y la solubilidad en agua de diferentes sales de litio, sodio y potasio a 25°C (298 K). En la gráfica se muestra que la mayoría de estos compuestos tienen solubilidades mayores a 10 g/L, a excepción del carbonato de litio y fluoruro de litio. Se muestra que es posible precipitar el carbonato

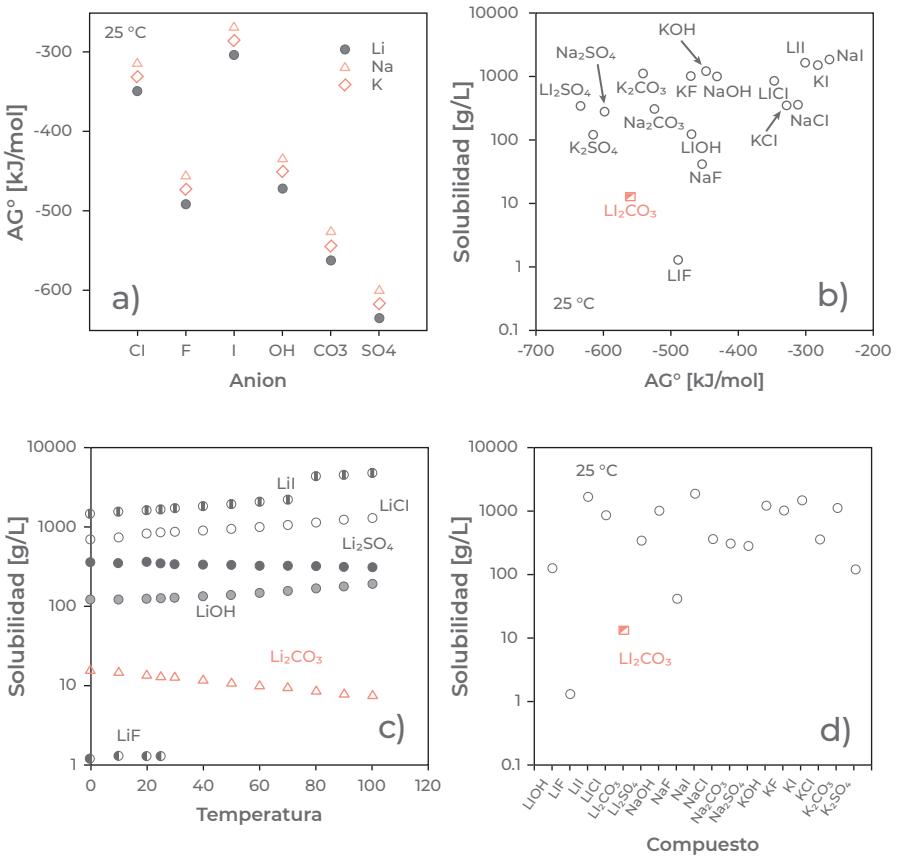
ELEMENTO CONTENIDO [% MASA]						CONTENIDO TÍPICO DE LI [% MASA]
K	SI	FE	C	MG	B	
						-
8.9	19.3	12.8				1.2 - 1.3
			16.26			-
		35.4				2.5 - 3.8
	30.2					1.9 – 3.3
	36.7					1.6 – 2.2
						0.9 – 1.8
						-
6.6	18.9					1.4 – 1.9
	25.2			16.4		0.36
	22.2					2.3 – 3.3
	27.5					1.3 – 1.7
	12.8				14.8	0.09 – 0.1

de litio, dado que tiene solubilidad limitada. El precipitado de carbonato de litio se puede obtener al usar carbonato de sodio o potasio combinado con cualquier sal de litio disuelta en agua, salvo el fluoruro.

En la figura 5c se observa la solubilidad en agua de diferentes compuestos de litio en función de la temperatura. Algunos incrementan su solubilidad al incrementar la temperatura, mientras que con otros ocurre lo contrario. El LiF tiene una solubilidad limitada, de aproximadamente 1 g/L. Después del LiF, el carbonato de litio tiene la segunda menor solubilidad en agua, además, al incrementar la temperatura, la solubilidad de Li_2CO_3 decrece por debajo de los 10 g/L.

La figura 5d presenta la comparación de la solubilidad de diferentes compuestos de litio, sodio y potasio en agua. El carbonato de litio y fluoruro de litio tienen la menor solubilidad en agua.

Figura 5. Propiedades termodinámicas y solubilidades de diferentes sales



Nota: *a*) Energía libre de Gibbs de formación a 25°C (298 K) de diferentes sales alcalinas. *b*) Relación entre la solubilidad y la energía libre de Gibbs de formación de diferentes sales alcalinas a 25°C (298 K). *c*) Solubilidad en agua como función de la temperatura de algunas sales de litio. *d*) Solubilidad en agua de algunas sales alcalinas a 25°C (298 K).
Fuente: HSC Chemistry (2021), Lide (2003).

Los menores valores de solubilidad del Li_2CO_3 en agua, mostrados en las gráficas de las figuras 5b, 5c y 5d, demuestran que el carbonato de litio precipitará antes que otros compuestos de litio, salvo el fluoruro.

ESTADO DEL ARTE DE TECNOLOGÍAS PARA LA EXTRACCIÓN DE LITIO

El litio se utiliza en forma de sales –hidróxido y carbonato–, las cuales se obtienen a través de procesos que se aplican a los diferentes tipos de yacimientos. Los procesos de extracción varían según el tipo de recurso mineral que contiene al litio, así como por factores geológicos, ambientales y tecno-económicos que pueden ser diferentes entre un sitio y otro.

Los proyectos más grandes de extracción de minerales de litio corresponden al procesamiento de pegmatitas –rocas duras–, salmueras y salares en Australia, Argentina y Chile. En la tabla 3 se listan los principales proyectos de producción mundial de litio en 2022.

Tabla 3. Mayores operaciones de extracción de litio en 2022

LOCALIZACIÓN	PAÍS	DUEÑO MAYORITARIO	TIPO DE MINERAL	PRODUCCIÓN 2022 (KT)
Greenbushes	Australia	Albemarle	Pegmatita	155.8
Salar de Atacama	Chile	SQM	Salmueras y salares	135.4
Mt. Marion	Australia	Ganfeng Lithium, Mineral Resources	Pegmatita	64
Pilangoora	Australia	Pilbara Minerals	Pegmatita	56.1
Salar de Atacama	Chile	Albemarle	Salmuera y salares	32.9
Salar de Hombre Muerto	Argentina	Livent	Salmuera y salares	32.8
Mount Cattlin	Australia	Alkem	Pegmatita	26.81
Bikita	Zimbabue	Bikita Minerals	Petalita	26.6
Salar de Uyuni	Bolivia	Yacimientos de Litio Bolivianos	Salmuera y salares	14
Salar de Olaroz	Argentina	Alkem	Salmuera y salares	13.8

Fuente: mining-technology.com (2023).

La figura 6 muestra un esquema de cómo se obtiene el litio, ya sea como producto intermedio –sales– o como producto final –baterías, vidrio, etcétera–. Los productos intermedios de litio se obtienen como resultado de aplicar los principios fisicoquímicos indicados en la sección Generalidades de litio de este capítulo. En el esquema se muestra que los minerales son procesados para obtener cloruros, carbonatos o hidróxidos antes de obtener los productos finales. Los minerales de donde se extrae el litio se obtienen ya sea por minería convencional o a partir del tratamiento de fuentes líquidas –salmueras y agua de mar– (Garret 2004).

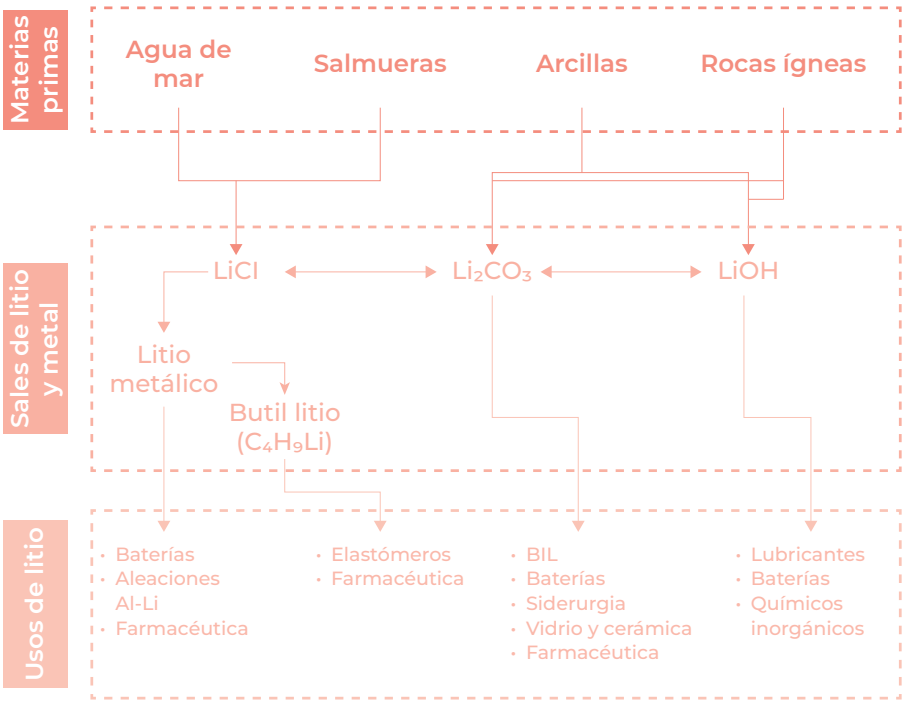
En esta sección se revisan los procesos de extracción de sales de litio de los diferentes yacimientos que existen en el mundo, incluyendo fuentes no convencionales.

EXTRACCIÓN DE LITIO DE SALMUERAS Y SALARES

Más del 60% del litio en el mundo se encuentra almacenado en salmueras (Liu et al., 2023, Li et al., 2023). Sin embargo, su extracción es relativamente complicada debido a su composición, la cual incluye elementos tales como: magnesio, sodio, potasio, calcio y boro. De estos últimos, el magnesio en particular dificulta la extracción de litio. Este tipo de salmueras se encuentran en salares, los cuales son grandes extensiones de tierra cubiertas de sales y otros minerales (figura 7). Las salmueras son soluciones acuosas con alto contenido de sales disueltas, como NaCl, KCl, LiCl y $MgCl_2$. Estos depósitos se procesan para obtener carbonato de litio equivalente (LCE[1]) a través de diferentes operaciones y procesos unitarios (Fuentealba et al., 2023). El LCE es un parámetro que agrupa y permite medir la producción de sales de litio –carbonatos e hidróxidos– en una sola unidad.

[1] Una tonelada de litio metálico (Li) equivale a 5 323 toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE).

Figura 6. Diagrama del procesamiento de litio de recursos naturales



Fuente: elaboración propia.

Se estima que alrededor del 48 % de la producción de litio en el mundo se produce a partir de salmueras de salares, principalmente el 40 % de Chile y Argentina. (Fuentealba et al., 2023)

Figura 7. Proyecto Caucharí-Olaroz en Jujuy, Argentina



Fuente: Lithium Americas[2].

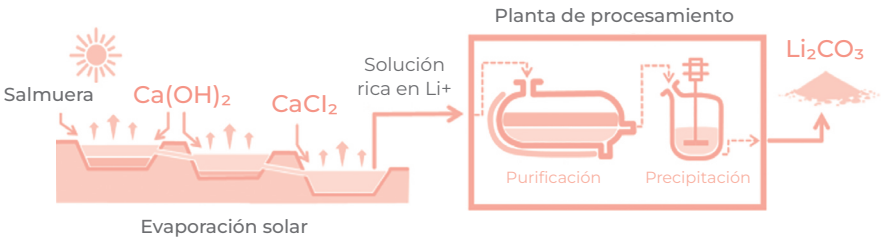
En la actualidad, el procesamiento de salmueras de salares requiere evaporación de agua para incrementar la concentración de litio, ya que su concentración es muy baja —entre 0.02 y 0.4%— (Tabelin et al., 2021), pues se deben remover impurezas como: sodio, potasio y magnesio. A través de la evaporación a la atmósfera se pierde entre el 85% y el 95% del agua en la salmuera, lo que equivale a la pérdida de entre 200 y 1400 m^3 de agua por tonelada de litio. La pérdida de esta cantidad de agua resulta en soluciones con concentraciones de litio de hasta el 6% (60000 ppm), (Fuentealba et al., 2023).

Esta solución rica en litio se lleva a una planta de procesamiento para la producción final de hidróxido o carbonato de litio. Aunque este proceso representa bajos costos de producción en comparación con otros, algunas de sus desventajas son su larga duración –puede tomar desde 10 hasta 24

[2] En https://www.worldenergytrade.com/metales/litio/argentina-lithium-americas-produce-el-primer-carbonato-cauchari-olaroz

meses–, además de las pérdidas de agua mencionadas. En la figura 8 se muestra el diagrama general de extracción de sales de litio de salmueras.

Figura 8. Diagrama del proceso de extracción de litio de salmueras de salares



Fuente: adaptado de Tabelin y colaboradores (2021).

El proceso de purificación consiste en una serie de etapas para remover impurezas como calcio, magnesio y boro de la salmuera rica en litio. Entre ellas, el magnesio se remueve al agregar caliza. También se agregan solventes orgánicos para remover el boro o se pueden utilizar intercambiadores iónicos para remover el magnesio, el calcio y el boro; la selección de los procesos depende de la composición de la salmuera de los sitios específicos. En la última etapa, el carbonato de litio (Li_2CO_3) se precipita al calentar la solución final y agregar carbonato de sodio. El Li_2CO_3 precipitado –grado técnico– se disuelve en agua a baja temperatura, la solución se vuelve a calentar a 80° C para precipitar carbonato de litio de grado de batería y, por último, se seca el producto en un horno rotatorio (Schenker et al., 2022).

Por otro lado, múltiples estudios cuantifican el impacto ambiental de las actividades de extracción de diferentes tipos de materiales, dentro de los cuales el litio no es la excepción. Khakmardan y colaboradores (2023) realizaron el análisis de ciclo de vida de las rutas de extracción de litio de diferentes operaciones en el mundo; para ello, cuantificaron los

recursos naturales y energéticos, así como las emisiones de GWP (potenciales de calentamiento global en kg de CO_2 equivalente / kg Li_2CO_3) necesarias para la producción de sales de litio de cinco procesos extractivos, incluyendo operaciones con minerales en rocas, salmueras y arcillas.

Para el análisis de ciclo de vida de los procesos extractivos en arcillas, se utilizaron reportes de factibilidad de algunos proyectos que no han iniciado aún, sin embargo, pueden ofrecer una proyección de los posibles efectos ecológicos asociados a las operaciones unitarias que se podrían requerir para la extracción de litio de las especies minerales hectorita y zinnwaldita.

Para la operación de extracción de litio de salmueras, Khakmardan y colaboradores (2023), cuantificaron las entradas —suministro— de recursos energéticos y materiales, así como las salidas de productos (figura 9). En este proceso, se requieren como insumos combustibles; energía eléctrica, agua, cal, alcohol, ácido sulfúrico y carbonato de sodio. Se obtienen residuos como cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de magnesio con agua, carbonato de magnesio y relaves; y se produce carbonato de litio.

Figura 9. Diagrama de ciclo de vida de la extracción de litio de salmueras de salares



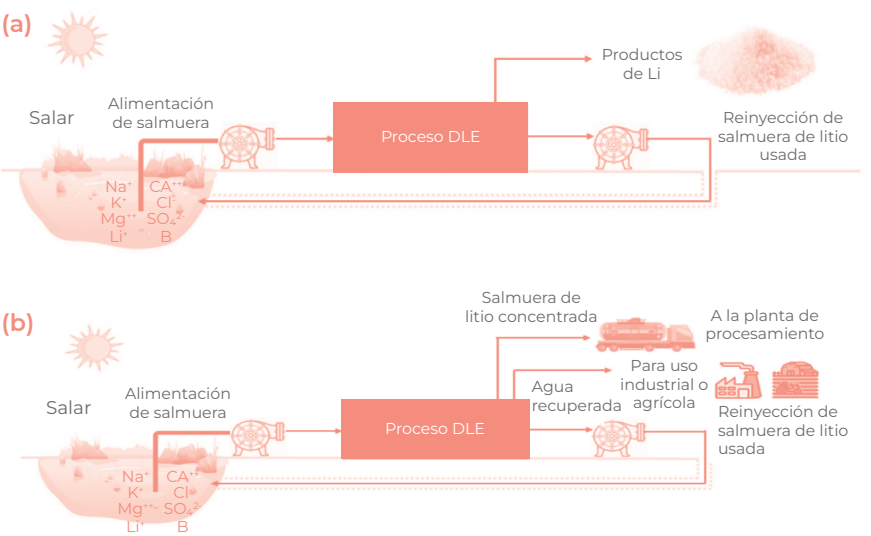
Nota: F (energía fósil), E (energía eléctrica), W (agua), L (cal), A (alcohol), SH (ácido sulfúrico), NC (carbonato de sodio), P (potasa), BI (cloruro de magnesio hexahidratado y carnalita de litio), TB (relaves) y WW (agua de desecho).
Fuente: adaptado de Khakmardan y colaboradores (2023).

La extracción de litio de salmueras es el proceso que genera la menor cantidad de emisiones (GWP), además de que tiene menor costo de producción en comparación con las rutas de extracción de rocas duras

–entre el 30 y el 50 % menos– lo que la hace la fuente de litio más atractiva para explorar (Meshram et al., 2014).

Aunque la extracción de litio de salmueras de salares representa menores costos de extracción, la gran cantidad de agua que se pierde por evaporación ocasiona un desequilibrio en los sistemas hídricos y en la biodiversidad de las regiones donde se lleva a cabo. Además, este tipo de yacimientos no se encuentra distribuido de manera uniforme en el mundo, por lo que es necesario hacer más eficientes los procesos, así como encontrar alternativas a las rutas convencionales de extracción.

Figura 10. Procesos tecnológicos que eliminan la etapa evaporativa del agua



Nota: *a*) Extracción directa de litio. *b*) Concentración de salmuera de litio.
Fuente: adaptado de Fuentealba y colaboradores (2023).

Frente a los efectos ecológicos adversos, se han desarrollado procesos tecnológicos que eliminan la etapa evaporativa del agua. Algunos de ellos son: extracción directa de litio (DLE por sus siglas en inglés) y concentración de salmuera de litio (LBC por sus siglas en inglés) (Fuentealba

et al., 2023). El proceso DLE se basa en la extracción selectiva de litio de la salmuera, lo que implica la separación o remoción de litio de esta solución. El proceso LBC se basa en concentrar la salmuera de litio, sin separarlo, para remover las impurezas y generar productos finales de litio. Ambos procesos se muestran en la figura 10.

(DLE) Extracción directa de litio:

- *Adsorción*. Un material sólido puede selectivamente capturar al litio desde una fase acuosa. Posteriormente el litio debe ser eluido de este sólido por medio de reactivos específicos, como el ácido clorhídrico.
- *Intercambio iónico*. Un material sólido –por ejemplo, una resina– puede intercambiar cationes desde su estructura química para unirse con los iones de litio. Después, el litio debe ser eluido de la resina con reactivos específicos.
- *Extracción por solventes*. Una fase líquida, por lo general orgánica, contiene un reactivo extractante, el cual puede formar un complejo químico con iones de litio extraídos de la fase acuosa, para después separar los iones de litio del complejo químico.
- *Precipitación*. Se agrega un reactivo específico a la solución que contiene litio para formar una fase sólida de este metal, típicamente con baja solubilidad.
- *Electroquímico*. Un gradiente de potencial eléctrico se usa para promover la transferencia de iones de litio de la salmuera hacia un electrodo, donde un material específico enlaza al litio, para después extraer el litio del electrodo en una etapa de elución.

(LBC) Concentración de salmuera de litio:

- *Electrodiálisis / Electromembrana*. Se usa un gradiente de potencial eléctrico para promover la transferencia de cationes y aniones a

los electrodos. Después se utilizan membranas de intercambio para separar aniones de cationes y generar una salmuera de litio purificada. Este sistema también ha sido estudiado integrando el proceso de precipitación para remover las impurezas de la salmuera.

- *Nanofiltración*. Una membrana polimérica hidrofílica que separa iones monovalentes y divalentes se usa para producir un concentrado permeado de salmuera de litio. La fuerza motriz de este proceso es la presión transmembrana. Este proceso se ha estudiado para separar el $Li+$ del $Mg^{2}+$.
- *Destilación por membrana*. Una membrana polimérica hidrofóbica separa la salmuera de litio de una fase acuosa o aire. El calor de la salmuera —a temperaturas mayores a 35 °C— permite la transferencia del agua en forma de vapor a la otra fase a través de los poros de la membrana, con la consiguiente recuperación del agua y concentración de la salmuera, en forma separada. La fuerza motriz de este proceso es el gradiente de presión parcial del agua.
- *Cristalización por membrana*. Trabaja de manera similar a la destilación por membrana, con la posibilidad de incrementar la concentración de la salmuera hasta un punto de supersaturación, lo que da lugar a la formación de cristales en la salmuera. La misma velocidad del flujo permite la continua remoción de cristales.
- *Recuperación de agua evaporada*. Mediante el diseño de un sistema de captación y recuperación de agua condensada del proceso de evaporación de los pozos, se recupera el agua que se evapora de ellos por acción solar.
- *Formación de hidrato*. Se utiliza un reactivo capaz de ser hidratado por agua —por ejemplo, el ciclopentano— con la finalidad de concentrar la salmuera de litio, debido al enlace entre el agua y el reactivo específico.

Los procesos de extracción de litio de salmueras de salares están en constante evolución para hacerlos más eficientes y reducir el consumo de

recursos. Se han estudiado diferentes alternativas a los medios evaporativos de concentración para producir sales de litio con menor impacto ambiental.

EXTRACCIÓN DE LITIO DE ROCAS DURAS O PEGMATITAS

Otra fuente importante de extracción de litio son las rocas duras o pegmatitas. En años recientes y conforme ha incrementado la demanda global de litio, ha aumentado la extracción de litio de las pegmatitas; se considera que la extracción de litio de rocas duras representa el 34% de la extracción global de litio; en la naturaleza existen más de 150 tipos de minerales de litio en rocas duras, pero sólo algunos tienen valor comercial, como la espodumena, la petalita, la lepidiolita y la zinnwaldita (Gao et al., 2023).

Las pegmatitas son rocas ígneas en yacimientos primarios de litio y tienen concentraciones de litio mayores que las de las salmueras; se alcanzan concentraciones de entre el 1 y el 4% con tasas de recuperación de entre el 60 y el 70% (Tabelin et al., 2021). La naturaleza de estos recursos dificulta la extracción, por lo que se requieren varias operaciones para obtener sales de litio con valor.

La espodumena y lepidolita son las especies minerales de litio más comunes. Los depósitos más grandes de espodumena se encuentran en Greenbushes, Australia (figura 11), con una reserva equivalente de 5.58 Mt de Li (29.7 LCE). Generalmente, la espodumena es de color blanco o grisáceo con un tono amarillo o verde, y suelen asociarse con cuarzo, feldespato y mica, con una gravedad específica de 3.1-3.2, las cuales tienen un contenido teórico de LiO del 8.03%, lo que las convierte en el mineral con la mayor concentración de litio; no obstante, requiere procesos de separación para incrementar la concentración de litio y hacer más eficiente el proceso.

El proceso extractivo de litio de rocas inicia con la etapa de conminución del material, la cual puede realizarse al combinar trituradoras y

molinos. Dependiendo del tamaño final de partícula requerido, después de la etapa de trituración, se puede implementar una etapa de molienda, en la que es normal que se usen molinos de bolas y molinos autógenos (Chagnes y Swiatowska, 2015; Garret, 2004).

Figura 11. Mina de explotación de roca dura de Greenbushes



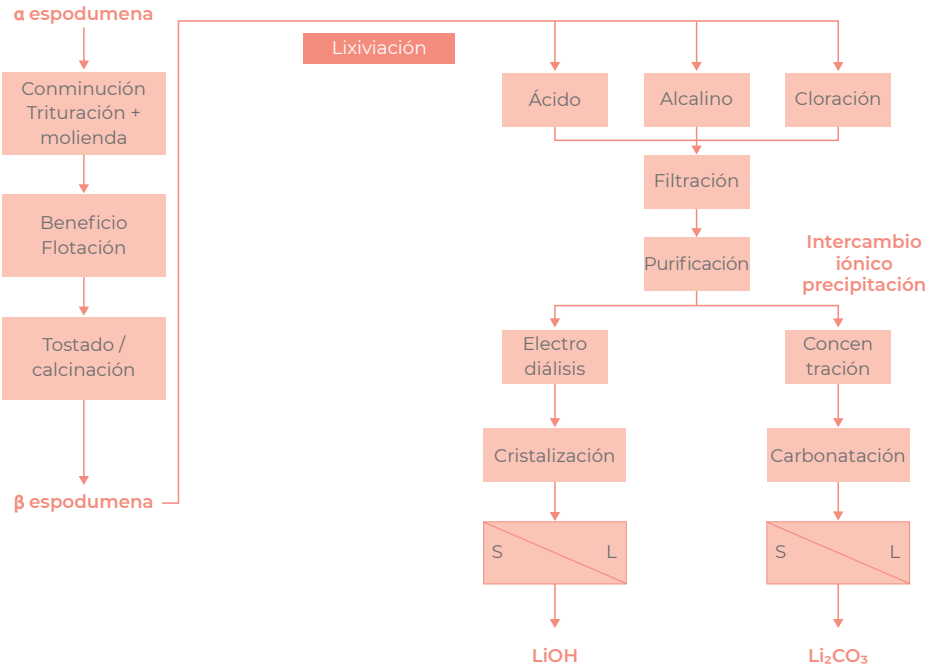
Fuente: mining.com

Tras la conminución, el mineral se somete a un proceso de concentración, que se realiza mediante técnicas de flotación por espuma. Se han reportado resultados experimentales en los que se ha definido que a través de mantener un pH de la pulpa de entre 7.5 y 9.8 se puede optimizar la recuperación de litio (Menéndez et al., 2004), al mantener una temperatura de 15 °C y velocidades de rotación menores a 1 040 rpm en las celdas de flotación, así como un contenido del 18 % de sólidos.

Después de la etapa de concentración, el mineral se envía a un proceso de tostación para favorecer la lixiviación, ya que la ocurrencia de espodumena en la naturaleza es en forma de α-espodumena, la cual tiene una estructura resistente al ataque de diferentes tipos de ácidos –a

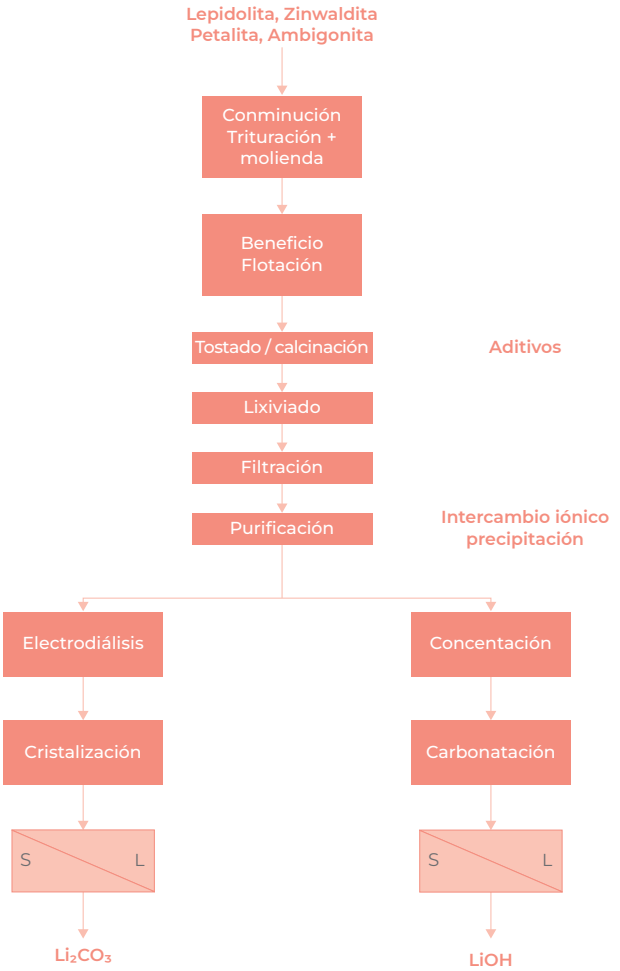
excepción del ácido fluorhídrico–, por lo que se requieren procesos de tostación/calcinación para transformar de α-espodumena a β-espodumena. Esto último favorece la reacción con ácidos y bases para formar una solución de hidróxido de litio o sulfato de litio. Una vez concluida la etapa de lixiviación, el lixiviado se somete a procesos de filtración y purificación, y a través de diferentes métodos se obtienen los productos finales de carbonato o hidróxido de litio. En las figuras 12 y 13 se muestra el proceso de producción de sales de litio de espodumena y lepidolita, respectivamente.

Figura 12. Diagrama del proceso de extracción de litio de espodumena



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Diagrama del proceso de extracción de litio de lepidolita



Fuente: elaboración propia.

La lixiviación es una etapa crítica del proceso de extracción de litio a partir de espodumena y lepidolita, en ella se ha estudiado la influencia de diferentes factores, como tipo de reactivo, temperatura de lixiviación y tiempo de reacción, entre otros.

Tomando como referencia el resumen de rutas de extracción de litio de rocas duras publicado por Gao y colaboradores (2023), en esta sección se describen algunas rutas extractivas.

Ruta ácida

En la ruta ácida se pueden utilizar diferentes reactivos. Algunos de ellos son: ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico y ácido nítrico. Entre estos últimos, el uso de ácido sulfúrico ha dominado la extracción de litio de espodumena a nivel industrial, mientras que las otras rutas ácidas han sido estudiadas a escala de laboratorio debido a los mayores costos que se presentan.

Método con ácido sulfúrico

Una de las rutas más utilizadas es la extracción de litio utilizando ácido sulfúrico, debido a la facilidad de control y calidad consistente. Este proceso tecnológico incluye: trituración, calcinación, tostación ácida, lixiviación, purificación, evaporación, precipitación de litio, concentración de anhídrido sulfato de sodio y cristalización (Gao et al., 2023).

El material triturado de α-espodumena se calcina entre 950 y 1,100 °C para transformar su estructura a β-espodumena, y someterlo a acidificación con ácido sulfúrico altamente concentrado en un horno rotatorio entre 250 y 300 °C para formar un sulfato soluble en agua. Después, este sulfato se lixivia con agua a 90 °C, se neutraliza el excedente de ácido sulfúrico con cal, y se ajusta el pH a entre 7 y 10 para remover impurezas como el aluminio y el hierro. De esta manera, se obtiene una solución cruda de sulfato de litio, con contenido de LiO del 10 % (ecuación 1).

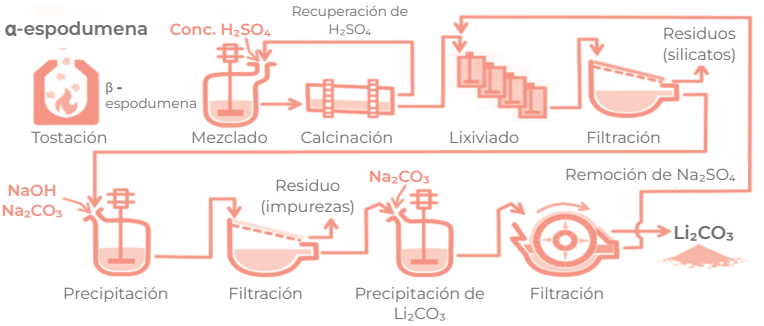
$$Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 + H_2SO \rightarrow Li_2SO_4 + Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 + H_2O \quad (1)$$

$$Li_2SO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Li_2CO_3 + Na_2SO_4 \quad (2)$$

Enseguida, se agrega una solución de cal en agua a la solución de litio cruda para remover la mayoría del magnesio y ajustar la solución a un pH de entre 11 y 12. A continuación, se remueven el calcio y el magnesio restantes al introducir carbonato de sodio. Por último, se evapora y concentra la solución filtrada para obtener una solución purificada de sulfato de litio con un contenido de litio de más del 20 %. En ese momento, el carbonato de litio se precipita al volver a agregar carbonato de sodio a la solución (ecuación 2). Acto seguido, se somete a procesos de centrifugado, deshidratado y secado, hasta obtener carbonato de litio. El licor madre separado se concentra y cristaliza para producir anhídrido sulfato de sodio y el agua restante se retorna al proceso de lixiviación.

En la figura 14 se muestra el diagrama de proceso de la ruta extractiva descrita. Este proceso, usando ácido sulfúrico ha demostrado ser muy adaptable para la extracción de litio de diferentes materiales. Sin embargo, tiene la desventaja de requerir altos consumos de ácido sulfúrico, además de que son mayores el consumo de energía, agua y la disposición de desechos. Por esta razón, se ha buscado reducir la concentración de ácido sulfúrico en estos procesos, con el objetivo de reducir el daño a equipos y optimizar la eficiencia de las condiciones de acidificación.

Figura 14. Diagrama del proceso de extracción de litio de espodumena mediante la ruta de ácido sulfúrico



Fuente: adaptado de Tabelin y colaboradores (2021).

Este proceso ácido también se ha probado para la extracción de litio de lepidolita, pero no ha tenido buenos resultados, sobre todo por las bajas tasas de lixiviación y la generación de una gran cantidad de ácidos residuales.

Método con otros ácidos

Dentro de la ruta ácida, se han realizado estudios con diferentes reactivos. El ácido fluorhídrico ha sido usado para la lixiviación de α-espodumena, la formación de fluoruro de litio y su posterior lixiviación —con ácido sulfúrico nuevamente—, con la ventaja de reducir la energía necesaria al eliminar el proceso de calcinación, pese a lo cual una desventaja es el tener muchos requerimientos de equipos. Asimismo, se ha investigado el uso de ácidos clorhídrico y nítrico para lixiviar β-espodumena, y los resultados mostraron que, a mayores concentraciones de ácido, se tiene mayor eficiencia de lixiviación de litio; Hunwick usó ácido nítrico como sustituto y analizó que la tasa de recuperación de nitrato de litio puede alcanzar el 95 % a 170 °C a 2 MPa (Gao et al., 2023). En la actualidad, la extracción de litio con estos reactivos sigue en investigación.

Ruta alcalina

Con el objetivo de reducir el consumo de energía y los costos de extracción a través de la ruta ácida con ácido sulfúrico, se ha investigado el uso de sustancias alcalinas como hidróxido de sodio, hidróxido de calcio y carbonato de calcio, los cuales pueden reaccionar directamente con minerales de litio, y favorecen su extracción. Tales procesos se describen a continuación.

Método con hidróxido de sodio

Mediante tratamiento térmico hidrotermal alcalino, la α-espodumena se convierte en hidroxi-sodalita, liberando el litio a la solución para ser precipitado y recuperado posteriormente (ecuación 3).

$$6\alpha\text{—}LiAlSi_2O_2 + 14NaOH \rightarrow 2Na_4Al_3Si_3O_{12}(OH) + 3Li_2SiO_2 + 3Na_2SiO_3 + 6H_2O \quad (3)$$

Con una concentración de 600 g/L, tiempo de reacción de dos horas, relación sólida / líquido de 1:5 y temperatura de 250 °C con una velocidad de agitación de 500 rpm, se alcanzó una tasa de lixiviación del 95.8 % (Gao et al., 2023).

Método con otros reactivos alcalinos

Por otro lado, se ha estudiado el uso de diferentes medios alcalinos, como hidróxido de calcio en lepidolita, hidróxido de sodio y agua para la extracción de litio de β-espodumena, al agregar cal, hidróxido de sodio y agua. También, en el caso de la petalita –otra especie mineral que contiene litio– se ha encontrado que al agregar óxido de calcio a la solución se alcanzan tasas de extracción de entre el 89 y el 92 % (ecuación 4) (Gao et, al. 2023).

$$Li(AlSi_4O_{10}) + 5NaOH + 4Ca(OH)_2(OH) \rightarrow LiOH + 2NaAl(OH)_4 + NaCa(HSiO_4) + 2H_2O \quad (4)$$

Aunque estos reactivos pueden reaccionar al entrar en contacto directo con minerales de litio –al reducir el consumo de energía y ofrecer altas tasas de recuperación–, todavía es necesario continuar la investigación a fin de definir las condiciones óptimas para la industrialización del proceso.

Proceso de cloración

Este método usa agentes de cloración para convertir el litio y otros elementos valiosos del mineral en cloruros para su extracción. Los agentes de cloración más usados son el cloruro y el cloro.

Método de cloruro

Se ha determinado que el cloruro de potasio y cloruro de sodio pueden convertir el litio en α-espodumena en cloruro de litio soluble a altas temperaturas (>1000 °C). Cuando se calcinan el cloruro de amonio, cloruro de sodio y espodumena a 750 °C se alcanza una tasa de conversión del 98 %. Se ha estudiado la factibilidad de reemplazar parte de los cloratos con otras sales, como el carbonato. Zhu y colaboradores (2008) calcinaron espodumena, cloruro de calcio y caliza a una relación de masas de 1:1:3 a 1000 °C para volatilizar el cloruro de litio y separarlo de las impurezas, y después lo colectaron y lavaron para precipitar carbonato de litio (ecuación 5) (Gao et, al. 2023).

$$\beta\text{—}\ Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 + 2NaCl + 2H_2O \rightarrow 2LiCl + Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O \quad (5)$$

Método con cloro

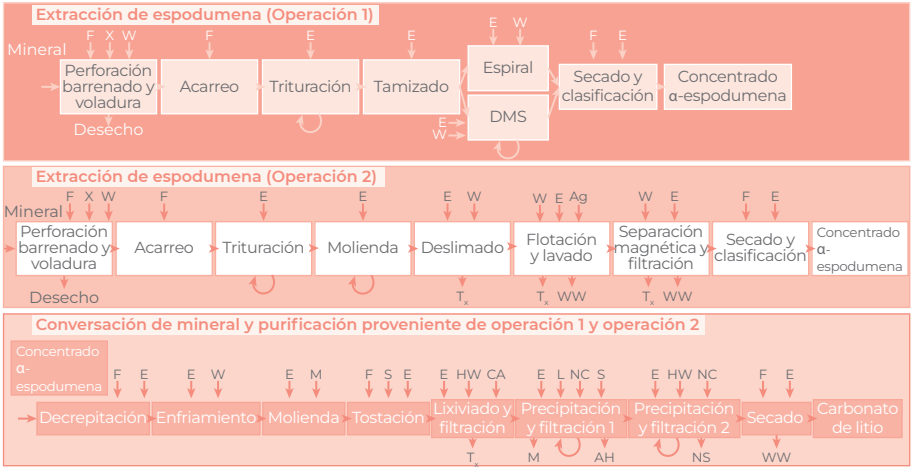
El cloro también se utiliza como agente de clorinación y tostación. Se alcanzaron tasas de extracción de litio y potasio del 92.49 % y el 71.06 % respectivamente, después de la tostación clorizante de lepidolita y cloruro a 850 °C por tres horas (Wu et al., 2012).

Ganfeng Lithium construyó una línea de producción piloto para la extracción de litio de lepidolita mediante tostación y clorinación con cloruro de sodio. Las ventajas del método de cloración son los bajos tiempos de proceso, altas tasas de recuperación de litio, poca generación de residuos y recuperación de potasio, rubidio y cesio. No obstante, algunas desventajas son la corrosión de los equipos y la difícil utilización de residuo lixiviado y flúor. Como reactivo de cloración, el cloro reacciona con facilidad ante el hierro y el calcio, lo que afecta la pureza de la solución y del producto. Además, el proceso con cloro requiere cloro puro y la temperatura de reacción es mayor que la del proceso con ácido sulfúrico, lo que representa un reto de industrialización en términos de equipo, seguridad y consumo de energía (Gao et al., 2023).

Como se puede observar, se han estudiado diferentes métodos de extracción de sales de litio de rocas duras, sobre todo de las especies espodumena y lepidolita, definiendo procesos que, en algunos casos, no son factibles fuera del laboratorio, debido a la complejidad y los altos costos tanto económicos como ambientales. Con ello se reafirma que la extracción de litio de minerales es una actividad que requiere varios procesos, recursos energéticos y materiales.

Es preciso resaltar que el método de ácido sulfúrico es el más utilizado en el proceso industrial de extracción de litio de espodumena, con una recuperación del 88% (Kuang et al., 2018; Rosales et al., 2014), lo cual lo vuelve adecuado para minerales de baja ley –de entre el 1% y el 1.5%– y alto contenido de litio en la solución lixiviante –entre 33 y 55 g/L–.

Figura 15. Diagrama del ciclo de vida de la extracción de litio de espodumena



Nota: F = energía fósil, E = energía eléctrica, X = explosivos, W = agua, AG = reactivos de flotación, M = molienda, S = ácido sulfúrico, HW = agua caliente, CA = aire comprimido, L = cal, NC = carbonato de sodio, TB = relaves, M = metales, AH = hidróxido de aluminio, NS = sulfato de sodio, WW = agua de desecho
Fuente: adaptado de Khakmardan y colaboradores (2023).

Por otro lado, en el caso de extracción de lepidolita, la ruta ácida con ácido sulfúrico trae consigo desventajas como la baja producción de litio y la dificultad de manejo de la escoria que se produce, por lo que se utiliza el método de calcinación a entre 800 y 1 000 °C con sulfato de sodio, para después lixiviar, evaporar y precipitar la sal de litio. Esto requiere un proceso más costoso respecto al de la extracción de espodumena. El impacto ambiental de estos contaminantes es de 9.3 a 60.4 veces mayor

que el extraer litio de salmueras. Si se toma como ejemplo el potencial de calentamiento global, la intensidad de la extracción de litio de minerales –15.59 tCO_2eq/t– equivale a 47.7 veces la intensidad de la extracción de salmueras –0.33 tCO2eq/t– (Gao et al., 2023).

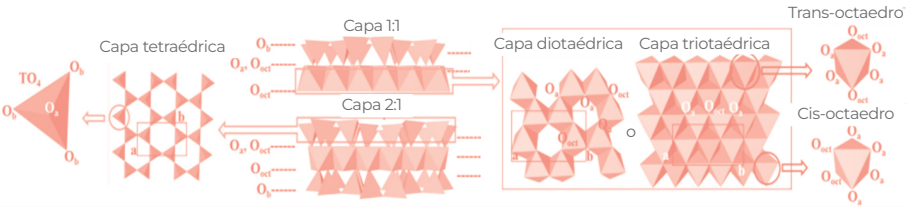
En el estudio realizado por Khakmardan y colaboradores (2023), se cuantificó el potencial de calentamiento global (GWP) como parámetro de comparación en los procesos extractivos de los diferentes minerales que contienen litio, dentro de las cuales, se evaluaron dos operaciones de extracción y procesamiento de litio de rocas duras. Los resultados se muestran en la figura 15, en la que se puede observar que la obtención de sales de litio de espodumena requiere el suministro de una gran cantidad de recursos naturales y energéticos, entre los cuales la mayor parte corresponde a combustibles fósiles, energía eléctrica y uso de reactivos como ácidos y agua.

EXTRACCIÓN DE LITIO DE ARCILLA

La tercera fuente natural de litio para su extracción son las arcillas con contenido de este metal. Existen diferentes depósitos de arcillas que contienen litio en el mundo, de los cuales, los principales se encuentran en los EE. UU., México, Serbia y China. Cada depósito tiene minerales con diferentes características y propiedades. Por este motivo, los procesos específicos, recursos energéticos y reactivos utilizados serán diferentes para cada tipo de mineral, ya que dependen de su estructura cristalina; razón por la cual, es importante analizar la estructura de este tipo de minerales para definir los procesos necesarios para la recuperación del litio contenido en ellas.

Las arcillas que contienen litio pertenecen a los filosilicatos. Su estructura cristalina se compone de dos capas tetraédricas y una capa octaédrica, es decir, capas del tipo 2:1 como se muestra en la figura 16 (Zhao et al., 2023).

Figura 16. Estructura cristalina en arcillas



Nota: Tetraedro [TO4] (hoja tetraédrica; dioctaédrica; trioctaédrica; modelos de estructura 1:1 y 1:2; orientación en cis-octaedro y trans-octaedro; O_a y O_b se refiere a átomos de oxígeno apicales y basales, respectivamente; a y b se refieren a los parámetros de celda unitaria, M y T indican al catión octaédrico y tetraédrico, respectivamente, O_{oct} (OH, F, Cl)
Fuente: adaptado de Zhao y colaboradores (2023).

Los principales minerales arcillosos que contienen litio en la naturaleza son la lepidolita, zinnwaldita, masutomilita, swinefordita, hectorita, cookita y jadarita (Zhao et al., 2023). Dentro de las cuales, la lepidolita, zinnwaldita y masutomilita son minerales del tipo trioctaédrico del grupo de las micas. La estructura básica de los minerales del grupo de las micas consiste en una capa catiónica ordenada octaédricamente e interpuesta entre dos capas tetraédricas idénticas pertenecientes al silicato estructural estratificado de tipo 2:1 (figura 17). Los minerales que contienen litio de este tipo de grupo responden a la fórmula química general $IM_{2\sim3}(T_4O_{10})(OH_2)$. Donde *I* puede ser un catión como K^+, Na^+, Ca^{2+}, Li^+. M puede ser un catión como Al^{3+}, Fe^{3+} o Mg^{2+}. T es un catión estructural ya sea Si^{4+} o Al^{3+}.

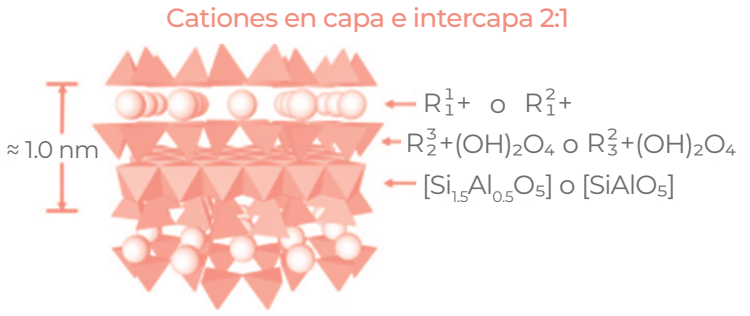
Cuando las capas tetraédricas y octaédricas características de las arcillas se unen en una capa, la estructura puede ser cargada negativamente; esta característica facilita la liberación de los iones de litio cuando se somete a procesos de lixiviación.

Las unidades tetraédricas básicas de un silicato (SiO_4^{4-}) forman grandes cadenas, o bien, forman redes más cortas que se unen entre sí mediante otros iones. En el primer caso, se forman capas bidimensionales que de manera eventual forman redes tetraédricas tridimensionales.

En el caso de las redes cortas, los grupos SiO_4^{4-} se encuentran aislados. Conforme la dimensionalidad de los tetraedros aumenta, los átomos de oxígeno se comparten entre más unidades estructurales (Fuentes y Reyes, 2002).

Esta diferencia estructural básica permite la creación de diferentes tipos de silicatos. Uno de ellos son las micas, cuya estructura tetraédrica tiene una carga eléctrica de -1. Para mantener la neutralidad en estas moléculas se requiere un catión de carga positiva. Por esta razón, el potasio es el catión más encontrado en las micas. El potasio se enlaza iónicamente con la estructura del silicato; a su vez esto produce dos tipos de estructura: tetraédrica-octaédrica (T-O) o tetraédrica-octaédrica-tetraédrica (T-O-T).

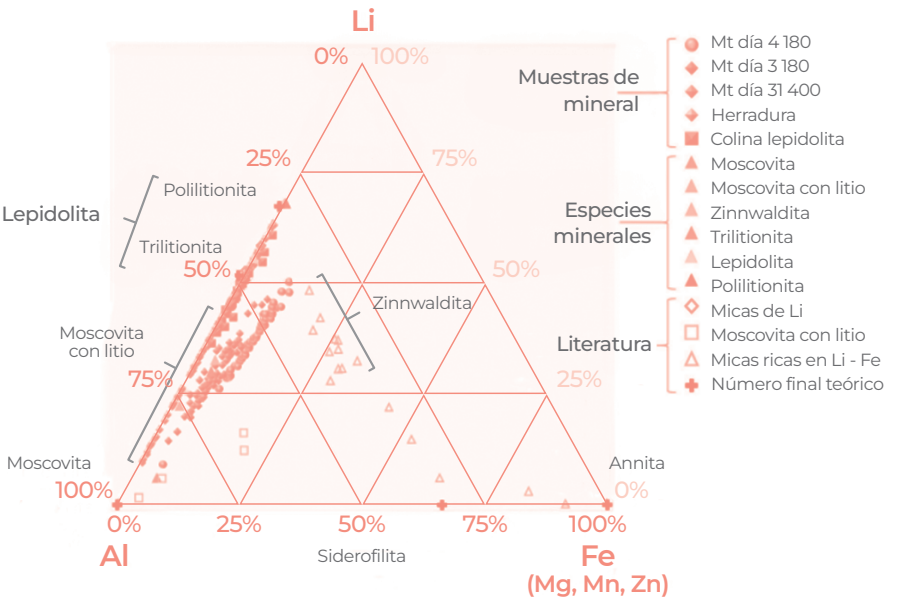
Figura 17. Estructura de la capa de lepidolita, zinnwaldita y masutomilita



Fuente: adaptado de Zhao y colaboradores (2023).

La composición química de la lepidolita es variada, atribuible a la relación indefinida entre aluminio y silicio en el grupo de cationes T (tabla 2). La lepidolita puede considerarse como una serie de soluciones sólidas entre micas que contienen aluminio de polilitionita y trilitionita (figura 18). La lepidolita existe como estructuras polimórficas diferentes, lo cual se ve reflejado en la dificultad de proponer un proceso único de extracción para este tipo de mineral.

Figura 18. Comparación de las micas que contienen litio reportadas en el diagrama ternario litio (Li) - aluminio (Al) - hierro (Fe)

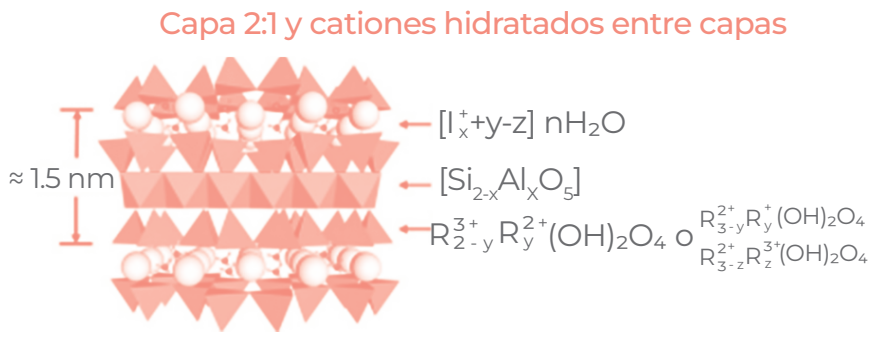


Fuente: adaptado de Zhao y colaboradores, (2023).

La siwnefordita y la hectorita pertenecen al grupo de minerales de arcilla de las esmectitas-vermiculitas, en las que el Li^+ se encuentra localizado sobre todo en las posiciones octaédricas. Este tipo de minerales son del tipo silicatos de estructura de capas 2:1, contienen agua entre capas bajo régimen de humedad normal y su fórmula general de composición química es: $I_{0.2\text{-}0.7}M_{2\text{-}3}(T_4O_{10})(OH,F)_2.nH_2O$ (figura 19).

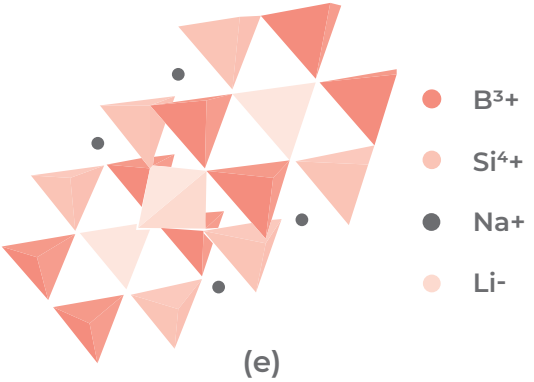
La jadarita es una nueva especie de mineral de la cuenca del Jadar, en Serbia. Su estructura consiste en una capa única no ramificada de Li, Si y B –coordinados tetraédricamente y compartidos en las esquinas– que, a su vez, contiene grupos BO_3 triangulares. El ion Na^+ se localiza en las posiciones octaédricas entre las capas tetraédricas (figura 20).

Figura 19. Estructura de la capa de swinefordita y hectorita



Fuente: adaptado de Zhao y colaboradores (2023).

Figura 20. Estructura de la capa de jadarita



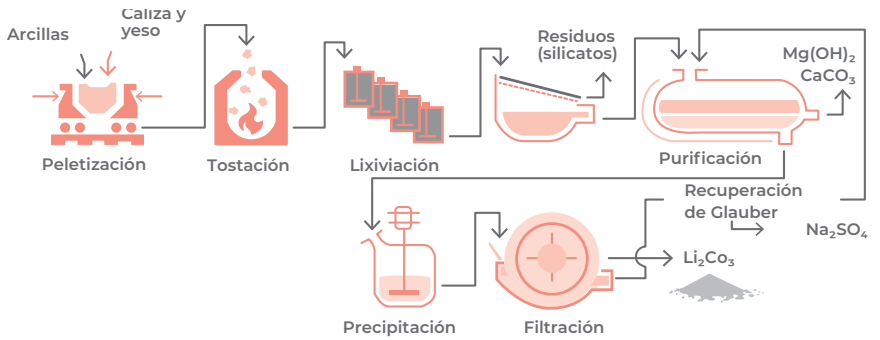
Fuente: adaptado de Zhao y colaboradores (2023).

La carga insaturada, agua, iones en la intercapa y gran área específica de los minerales de arcilla les dan la capacidad de adsorción, intercambio de iones, expansibilidad y dispersión. De esta forma, pueden adsorber sustancias por fuerzas de Van der Waals y alcanzar equilibrio dinámico. Dado que los minerales de arcillas tienen límites de cristales cargados positivamente, los grupos aniónicos pueden atraer de forma electrostática y adsorber dentro de las superficies en los límites de la arcilla. Cuando los

electrolitos están presentes en el medio, cationes inorgánicos pueden actuar como puentes para conectar la arcilla con polímeros aniónicos, lo que permite la adsorción de agregados en la superficie de los minerales de arcilla. Los iones adsorbidos en la superficie de los minerales de arcilla pueden experimentar intercambio de iones con otros iones en la solución.

Aunque cada tipo de mineral de arcilla tiene sus características –lo que obliga a definir un proceso específico para cada uno de ellos–, de manera general, el procesamiento de arcillas puede tener etapas de tostación, lixiviación, precipitación y purificación (figura 21).

Figura 21. Diagrama general de proceso de extracción de litio de arcillas



Fuente: adaptado de Tabelin y colaboradores (2021).

Igual que la extracción de litio de rocas duras, la lixiviación es una etapa crítica en la que algunos autores han estudiado el uso de ácidos. A continuación, se describen los métodos de extracción de litio en arcillas.

Métodos de acidificación.

Con base en el intercambio de iones entre H^+ y Li^+, el tratamiento por acidificación ha sido usado para extraer litio de minerales de arcilla. El método por acidificación puede convertir silicatos que contienen litio en

formas solubles y disolver parte de la estructura en capas del silicato, lo que, por consiguiente, incrementa el área de contacto específica de la interfase mineral-ácido, así como la eficiencia del intercambio. El proceso de tostación se puede llevar a cabo antes del tratamiento por acidificación. La tostación puede incrementar el volumen de los minerales de arcilla, así como el área de contacto de la reacción. Al mismo tiempo, la tostación destruye la estructura cristalina de los minerales de arcilla, por lo que los sitios del arreglo cristalino de Li^+ pueden ser ocupados con facilidad por H^+, lo cual incrementa la cantidad de litio lixiviado.

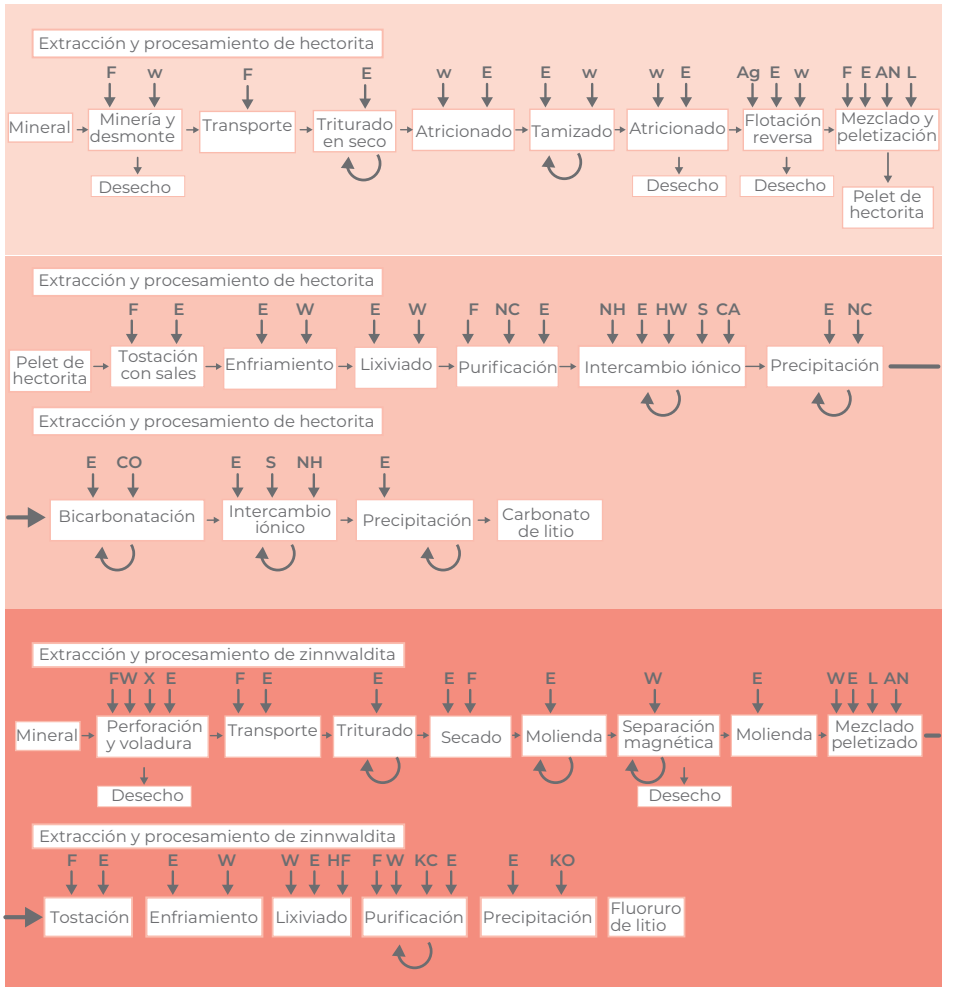
Lixiviado con ácido sulfúrico

Los minerales de arcilla que contienen litio son tratados con H_2SO_4 para reemplazar Li^+ con H^+, lo cual forma sales de litio solubles en agua. Al mismo tiempo, K^+, Rb^+, Cs^+, Al^{3+} y otros iones metálicos pueden ser convertidos en las correspondientes sales solubles, que deben ser separadas antes de la precipitación de las sales de litio. La disolución de lepidolita en la solución rica de litio Li_2SO_4 mediante el uso de H_2SO_4 y sales de litio producidas por purificación son los procesos básicos de la lixiviación con H_2SO_4.

Además del análisis de ciclo de vida que Khakmardan y colaboradores (2023) realizaron para procesos extractivos de litio de rocas y salmueras, analizaron el ciclo de vida para el procesamiento de arcillas que lo contienen en especies hectorita y zinnwaldita (figura 22), donde se observa que, el proceso extractivo de litio de este tipo de minerales puede requerir varias operaciones unitarias, suministros, materias primas y energía.

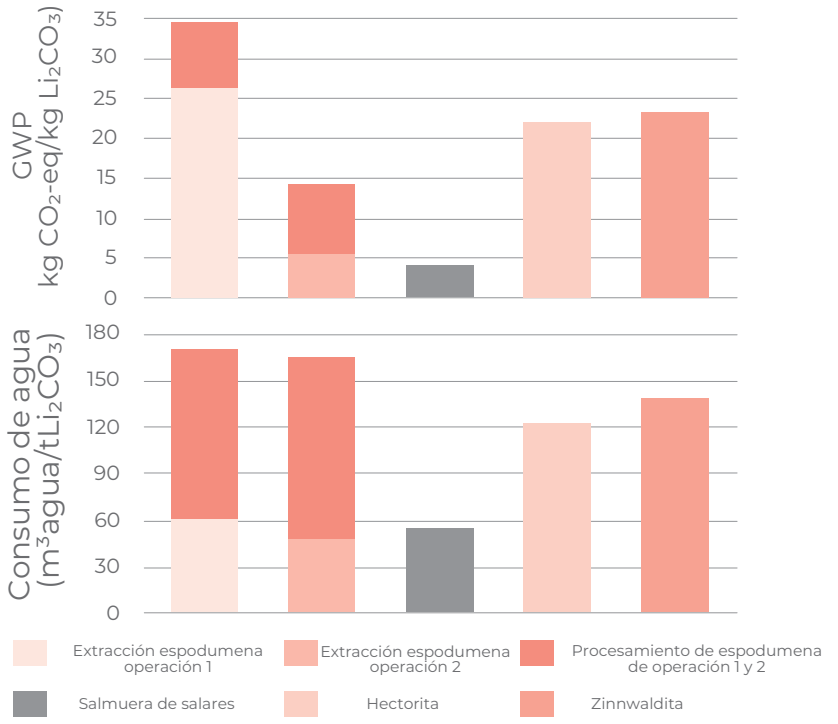
En la figura 23 se muestra el comparativo de generación potenciales de calentamiento global (GWP) —en tCO_2 equivalente— y el consumo de agua de las cinco operaciones reportadas por Khakmardan y colaboradores (2023), donde se observa que, junto con las operaciones de procesamiento de rocas, las rutas extractivas de arcilla también podrían generar altas cantidades de GWP, así como altos consumos de agua.

Figura 22. Diagrama de ciclo de vida
de la extracción de litio de arcillas



Nota: F (energía fósil), E (energía eléctrica), W (agua), AG (reactivos de flotación),S (ácido sulfúrico), HW (agua caliente), L (cal), NC (cloruro de sodio), AN (sulfato de calcio), NH (hidróxido de sodio), CA (aire comprimido) y CO (dióxido de carbono), X (Explosivos), HF (Fluoruro de hidrógeno), KC (carbonato de potasio), KO (hidróxido de potasio)
Fuente: adaptado de Khakmardan y colaboradores (2023).

Figura 23. Comparación de generación de GWP y consumo de agua entre operaciones extractivas de litio de espodumenas, salmueras de salares y arcillas que lo contienen.



Fuente: adaptado de Khakmardan y colaboradores (2023).

EXTRACCIÓN DE LITIO POR RUTAS EMERGENTES

Debido a la creciente demanda de litio y a la importancia de asegurar un suministro confiable de este elemento, ha sido necesario estudiar rutas alternativas de extracción. En esta sección, se describen los avances en los principales proyectos de extracción de litio de estas rutas emergentes.

Extracción de litio de salmueras geotérmicas

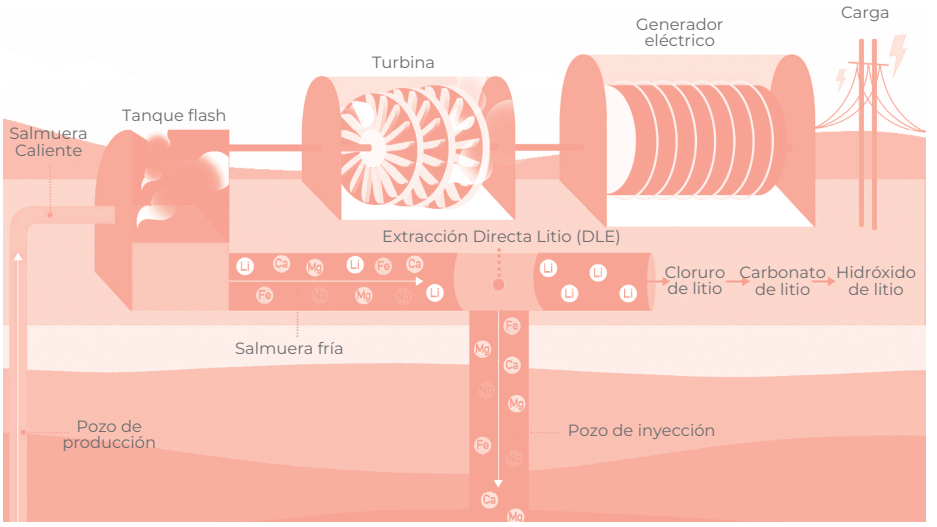
Una de las rutas emergentes que ha suscitado mayor interés es la extracción de litio de salmueras geotérmicas, debido a que su procesamiento es relativamente económico y tiene un menor impacto ambiental comparado con rutas de extracción previamente descritas (Kölbel et al., 2023). Sin embargo, por el momento continúan en etapa de ensayos a escala piloto y de laboratorio.

Las salmueras geotérmicas son soluciones salinas concentradas, que fluyen a través de rocas muy calientes en regiones geotérmicas subterráneas —entre 1000 y 3000 m de profundidad—, de modo que lixivian las rocas y producen salmueras enriquecidas en litio, boro, potasio, magnesio, calcio, bromo y cloro (Mends et al., 2023). Una de sus ventajas es que la disolución de los iones de los minerales en la salmuera, incluyendo el litio, se realiza de forma natural en el interior de la tierra, lo que evita la contaminación de los suelos y de los mantos freáticos, además, elimina el riesgo de afectación ambiental con productos químicos de alta toxicidad.

Estas salmueras se utilizan en plantas geotérmicas para aprovechar su energía térmica y producir vapor, que después se utiliza para la generación de energía eléctrica mediante turbinas de vapor (figura 24). Normalmente el agua de la salmuera en la central geotérmica es reinyectada a la tierra mediante pozos de inyección, sin extraerles algún otro beneficio más que el aprovechamiento de su energía calorífica. Por este motivo, extraer el litio —y otros elementos— de la salmuera antes de su reinyección podría contribuir a reducir el costo de producción de energía eléctrica al extraer elementos valiosos, además de ser un recurso de producción de litio. Para ello, el proceso de extracción se debe ajustar con base en las características y propiedades específicas de la salmuera de cada instalación geotérmica (Toba et al., 2021).

Entre los proyectos más importantes de extracción de litio de salmueras geotérmicas se encuentran el de Graben del Río Rin, Alemania y el de Salton Sea California, EE. UU.

Figura 24. Diagrama del proceso de generación de energía eléctrica en una planta geotérmica



Fuente: piensageotermia.com

En Europa, el proyecto del Graben del Río Rin provee condiciones excelentes para el uso de energía geotérmica. Un total de cinco plantas geotérmicas se encuentran en operación en Alsacia, Francia, y Bruschsal, Alemania, para producir electricidad. La instalación de Bruschsal provee calor y energía eléctrica.

Los fluidos geotérmicos profundos usados en las instalaciones geotérmicas tienen concentraciones de litio de entre 163 y 190 mg/L. Se han reportado avances interesantes sobre las técnicas de extracción directa de litio de salmueras geotérmicas de este proyecto, los cuales se resumen a continuación.

Se estima que, en la región del Graben del Río Rin –mediante el empleo de los flujos volumétricos y contenidos de litio específicos de las salmueras geotérmicas producidas en la actualidad– las instalaciones geotérmicas existentes podrían producir 6 500 toneladas métricas (TM)

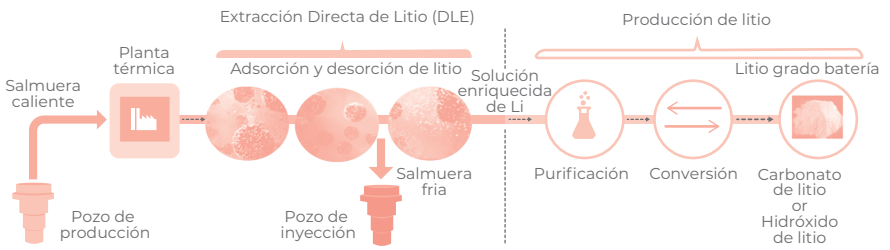
de LCE al año. Bajo el supuesto de una recuperación de litio del 90%, la cifra mencionada correspondería a producir 150 000 baterías de ion litio con capacidades de 60 kWh por cada una (Kölbel et al., 2023).

Las técnicas DLE para salmueras geotérmicas deben ser capaces de operar en soluciones complejas con altas concentraciones de sodio, potasio y otros elementos. Para ello, es necesario conocer las propiedades específicas de la salmuera a tratar. Las técnicas DLE utilizan un reactivo extractante para adsorber selectivamente el litio contenido en tales soluciones. El objetivo de la extracción directa es extraer sólo iones de litio y dejar atrás otros elementos.

Al añadir un reactivo extractante a la salmuera que contiene litio junto con otros iones metálicos, se remueve de forma selectiva los iones de litio de la solución compleja hasta alcanzar el equilibrio.

Una vez que se logra, el extractante se satura en iones, entre ellos iones adsorbidos de litio. En la figura 25 se muestra el diagrama del proceso de extracción de litio de salmueras geotérmicas.

Figura 25. Diagrama del proceso de extracción directa de litio de salmueras geotérmicas



Fuente: adaptado de Kölbel y colaboradores, (2023).

Los métodos de extracción de litio de salmueras geotérmicas y otras salmueras han sido estudiados usando diferentes métodos y tecnologías. Algunas de las que han sido reportadas se pueden clasificar como:

membrana, electroquímica, extracción por solvente, adsorción por tamiz de iones y técnicas de precipitación. Los procesos de extracción de litio de salmueras geotérmicas siguen en desarrollo y tienen el potencial de convertirse en una alternativa viable como ruta alternativa (Kölbel et al., 2023).

Método de intercambio de iones y procesos de adsorción

Esta tecnología separa los iones de litio de las soluciones salobres al usar óxidos de tamiz de iones con estructuras químicas distintas e introduce una técnica para recuperación de litio de soluciones con muchos iones coexistentes como Na+, Mg2+, K^+ y Ca^{2+}.

Los adsorbentes de tamiz iónico son sustancias inorgánicas que contienen iones agregados en sus sitios cristalinos y por lo tanto pueden extraer iones objetivo por adsorción física o química y por intercambio iónico. A través del intercambio iónico, los iones objetivo pueden ser retenidos en los sitios cristalinos si su radio iónico es de tamaño similar al radio del ion que será desplazado. Por lo tanto, los iones desplazados producen un efecto de selección coherente que permite una adsorción selectiva del ion objetivo.

Recuperación de litio de baterías gastadas

Además de los recursos de minerales, el reciclaje de litio de materiales que lo contienen, como las baterías de ion de litio, también podría ser considerado como una fuente del metal. En este sentido, Simon y colaboradores (2015) indicaron la necesidad de desarrollar instalaciones para reciclar baterías de desecho para recuperar litio. Dentro de las más usadas se encuentran las BIL y níquel hidruro metálico (NiMH) debido a su desempeño general y ligereza, entre otras propiedades (Zeng y Li, 2013).

Las BIL de dispositivos móviles que se desechan al final de su vida útil contienen materiales valiosos, como litio, cobalto, níquel y manganeso.

Además, si no se disponen de forma adecuada, estos dispositivos pueden representar daños al ambiente debido a la posible contaminación con materiales peligrosos.

Está reportado que, 28 t de baterías usadas podrían producir 1 t de litio, lo que equivaldría al procesamiento de 250 t de minerales o 750 t de salmueras. Se estima que, alrededor del 77% del consumo de litio de la Unión Europea para el año 2050, provendrá de fuentes secundarias, en especial BIL usadas, en contraste con la situación actual en la que, menos del 1% del abasto total de litio proviene del reciclaje de baterías (Kong et al., 2023).

De manera general, el procesamiento de baterías usadas para recuperación de litio se puede dividir en tres etapas: pretratamiento, tratamiento secundario y recuperación profunda (Xing et al., 2023).

Pretratamiento

Consiste en descargar la electricidad de las baterías para evitar algún riesgo de corto circuito y autoignición en su manipulación, debido a la energía remanente en ellas. En este proceso de descarga se pone la batería en cortocircuito, se la conecta a resistores y se la sumerge en una solución salina de sulfato de sodio o cloruro de sodio.

Después, las baterías gastadas se someten a tratamiento térmico y mecánico para remover el plástico, separadores orgánicos y la carcasa metálica. Este desmantelamiento puede ser manual o a través de procesos mecánicos como trituración, tamizado, clasificación magnética y segregación. Un diagrama de referencia de este proceso se presenta en la figura 19 del capítulo 4.

Al terminar la trituración y tamizado, las hojas de cobre y aluminio, así como plásticos, se encuentran en forma de partículas gruesas. Las sustancias del electrodo como $LiCoO_2$ y grafito se encuentran, fundamentalmente, en forma de partículas finas. Las partículas de cobre y

aluminio se pueden separar mediante la aplicación de corrientes parásitas, mientras que los plásticos se separan por una mesa densimétrica.

Los tratamientos térmicos preliminares se suelen usar para remover aglutinantes y carbón en los cátodos, así como para segregar las sustancias catódicas activas.

Procesos de tratamiento químico preliminar.
Se utilizan soluciones alcalinas y solventes orgánicos para liberar la sustancia del electrodo de las hojas de aluminio o se emplean fluidos supercríticos –fluidos que combinan propiedades de líquido y gas– para extraer electrolitos. Con base en el principio de similitud-intermiscibilidad, solventes orgánicos –como la N-metilpirrolidona– se usan para disolver aglutinantes y desprender las sustancias activas de las capas de aluminio, dado que la estructura de los materiales del electrodo se mantiene de forma relativa.

Por otro lado, con el uso de soluciones alcalinas se disuelven las capas de aluminio, mientras que los aglutinantes se eliminan más adelante por calcinación a fin de obtener una sustancia de electrodo activa pura. Esta técnica permite una gran eficiencia de extracción de aluminio y preserva otros metales, pese a lo cual hay pérdidas y las placas de aluminio no tienen forma metálica. Por otro lado, la disolución con solución alcalina introduce impurezas por lo que se hacen necesarios procesos de recuperación ulteriores (Dobo et al., 2023).

Procesos de tratamiento mecánico–químico
Una combinación de procesos de pretratamiento mecánico y químico se usa para separar sustancias activas de las baterías. La

reducción de tamaño de partícula genera un incremento de las actividades de reacción para posteriores procesos de lixiviado por ácido, y destruye la estructura original de la batería de desecho para mejorar la eficiencia de la lixiviación. Esta técnica es simple y económica, pero no se utiliza a escala industrial debido a los largos tiempos de reacción (Wang et al., 2017).

Los tratamientos descritos previamente corresponden a la etapa de pretratamiento, de la cual se obtiene como producto final la *masa negra*, que se envía después al tratamiento secundario.

Tratamiento secundario

En esta etapa los metales valiosos de la masa negra se extraen por procesos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, biolixiviación o su combinación, al transformarse en iones metálicos en el lixiviado.

Proceso pirometalúrgico **(Dobo et al., 2023)**
Este tipo de procesos utilizan altas temperaturas para recuperar y purificar metales valiosos vía transformaciones físicas y químicas (Yun et al., 2018; An 2019; Lv et al., 2018; Liu et al., 2019). Los cambios estructurales y las transformaciones de fase ocurren a bajas temperaturas, mientras las reacciones químicas ocurren a altas temperaturas. El objetivo de este proceso es transformar los elementos de batería en fases favorables para ser sometidos a procesos hidrometalúrgicos más adelante (Windisch-Kern et al., 2022).
Los productos obtenidos del proceso pirometalúrgico pueden ser utilizados para sintetizar nuevas sustancias catódicas. No obstante, se generan gases tóxicos –como CO_2–, y el número de sustancias recuperadas es limitado –sólo se recuperan el cobre, níquel y cobalto, lo que representa un 30 % en peso de las baterías de

dispositivos electrónicos–. Otros materiales como plásticos, grafito y aluminio no se recuperan. Esta tecnología podría no funcionar bien para BIL gastadas de vehículos eléctricos debido a su bajo contenido de cobalto. Además, la industria de baterías para vehículos está reduciendo el contenido de cobalto, y de forma eventual alcanzará electrodos libres de este.

Fundición (Dobo et al., 2023)
La fundición es uno de los métodos más eficientes para la recuperación de elementos valiosos de baterías gastadas. Gracias a su productividad y simplicidad, es muy aplicado en la industria. En este proceso las sustancias de las baterías se calientan por encima de su punto de fusión, lo que facilita la segregación de elementos metálicos en la fase líquida a través de reducciones y consiguientes formaciones de capas fundidas inmiscibles (Makuza et al., 2021).

Durante la fundición, los materiales de las baterías son calentados a bajas temperaturas para evaporar los electrolitos y prevenir explosiones por sobrepresión. Después, se calientan los materiales de las baterías a altas temperaturas hasta fundirlos. Los principales subproductos que se obtienen son escorias y aleaciones metálicas. La aleación metálica contiene metales valiosos como níquel, cobalto y cobre, que pueden ser recuperados mediante hidrometalurgia. La fracción de escoria, por lo general, contiene litio y manganeso que también pueden ser recuperados por hidrometalurgia o pueden ser utilizados en la industria del cemento (Harper, 2019). El aluminio presente en la aleación actúa como un agente reductor de los requerimientos de energía y los plásticos, electrolitos y ánodos de las baterías se oxidan y generan energía para el proceso de fundición.

Reducción térmica

Durante la reducción térmica las sustancias catódicas activas se calientan con un reductor de coque, carbón, a fin de dejar el residuo de carbono y una mezcla de compuestos intermedios para refinación subsecuente. El material de carbono –en especial el grafito anódico de desecho– es un gran reductor para el proceso (Zhang et al., 2020b). Comparada con el proceso de fundición de alta temperatura, la reducción térmica presenta las ventajas de obtener altas tasas de recuperación de metales con pocos requerimientos de energía.

Tostación de sales

Este proceso busca convertir compuestos metálicos en sales solubles en agua por tostación con sales y ha probado ser eficiente para segregar metales en óxidos de metales de transición de litio (Shi et al., 2019b). Este proceso tiene potencial para mejorar la efectividad del reciclaje, así como para reducir la emisión de gases peligrosos y el consumo de ácidos. Los procesos de tostación con sales incluyen la tostación por nitración, clorinación y sulfatación. Jian y colaboradores (2021) propusieron un proceso de tostación por clorinación junto con lixiviación con agua para recuperar manganeso, cobalto, níquel y litio de sustancias catódicas de tipo NMC. Bajo condiciones óptimas –temperatura de tostación 35 °C, 30 minutos, relación de masas de NH_4Cl a polvo catódico 2:1– se logró el lixiviado del 9 % de cobalto, litio y níquel y el 97 % de manganeso al líquido con una alta concentración.

Hidrometalurgia (Dobo et al., 2023)
Después de las etapas de pretratamiento, la hidrometalurgia se usa para la recuperación de elementos de alto valor, como manganeso, litio, níquel, y cobalto en elementos individuales, nuevas sustancias catódicas o precursores. La tecnología de reciclaje por hidrometalurgia se puede dividir en dos etapas: el lixiviado de las BIL y la recuperación de elementos de alto valor del lixiviado (Chagnes y Pospiech, 2013).

Algunos de los lixiviantes más utilizados en la primera etapa son: solución de bacterias, solución alcalina y solución ácida. Los metales de alto valor del lixiviado son separados y recuperados a través de varias tecnologías, como extracción por solventes, electrólisis, precipitación, intercambio iónico y otros.

La hidrometalurgia ofrece ventajas de bajas emisiones, pocos requerimientos de energía y altas tasas de recuperación de metales con gran pureza, comparada con la técnica pirometalúrgica. Por lo tanto, la hidrometalurgia se considera más apropiada para el reciclaje de BIL gastadas. Sin embargo, algunas de las desventajas son que se requiere de una adecuada clasificación previa de las baterías, lo cual incrementa los costos y la complejidad de los procesos de reciclaje. Además, la separación de aluminio, cobre, hierro, manganeso, níquel y cobalto en la solución lixiviante es un reto debido a la similitud de sus propiedades químicas. El costo de la disposición del agua de desecho generada es otra desventaja. Para asegurar la viabilidad del proceso hidrometalúrgico, es necesario diseñar procesos simples, así como tener alta efectividad de recuperación y bajas tasas de consumo de reactivos (Chen M. et al., 2019b).

Lixiviado

La etapa de lixiviación consiste en disolver y convertir elementos valiosos de las baterías en iones metálicos en soluciones lixiviadas. Los metales iónicos en el lixiviado son separados y recuperados más adelante a través del uso de sustancias ácidas, alcalinas y biolixiviantes.

Lixiviado ácido

Se refiere al uso de ácidos inorgánicos y orgánicos para disolver metales en BIL gastadas. Los ácidos inorgánicos incluyen HCL (Xuan et al., 2019; Barik et al., 2017), H_2SO_4, (Fan et al., 2021; Li et al., 2019; Zhang et al., 2018), HNO_3, (Cognet et al., 2020) y H_3PO_4 (Chen C. et al., 2019a). A su vez, se pueden utilizar agentes reductores como Na_2SO_3 o H_2O_2 para mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación. El uso de ácidos inorgánicos ofrece una operación simple y alta eficiencia de lixiviación, pero genera corrosión en los equipos, contaminantes de desecho de ácidos y emisiones de gases peligrosos.

La lixiviación con ácidos orgánicos es un método que incluye ácido tricarboxílico, ácido dicarboxílico, ácido ascórbico, ácido oxálico, ácido monocarboxílico, ácido acético y ácido fórmico. El uso de este tipo de ácidos orgánicos se ha estudiado como alternativa para la lixiviación de baterías debido a que tiene diferentes ventajas: buena reciclabilidad, fácil degradación, amplia acidez para lixiviación y menores emisiones secundarias. Sin embargo, presenta inconvenientes para su aplicación a escala industrial, ya que los costos son mayores comparados con los ácidos inorgánicos y tienen menor tasa de lixiviación (Gao et al., 2018a).

Lixiviado alcalino

Este proceso: *1*) utiliza la interacción entre elementos metálicos y iones de hidróxido en un medio alcalino; *2*) disuelve metales de forma selectiva; y *3*) puede eliminar etapas posteriores de purificación y separación costosas.

El NaOH se usa por lo general para lixiviar materiales de batería para remover aluminio de forma selectiva, conforme este metal es capaz de disolverse en medios alcalinos o ácidos, mientras que metales como Mn, Co, Ni son insolubles en soluciones alcalinas. Los cátodos lixiviados con NaOH –bajo condiciones de solución del 15 % en peso, a 50 °C durante una hora, y una relación 0.1 g/ml de sólido-líquido– pueden remover de forma selectiva el 58 % de Al y dejar la mayoría de litio y cobalto en el residuo. Asimismo, el 99.9 % de aluminio en polvo del electrodo fue lixiviado después de cuatro horas a temperatura ambiente en solución al 5 % de NaOH con una relación sólido-líquido de 0.1 g/ml (Dobo et al., 2023).

Biolixiviado (Dobo et al., 2023)

Es un proceso de lixiviado de baterías que utiliza ácidos generados por la metabolización de microorganismos. El biolixiviado es una alternativa atractiva dado que representa bajos costos, es amigable con el ambiente y requiere menores implementaciones industriales, es decir, no requiere de equipos especializados. Sin embargo, este método es tardado, ya que tiene bajas tasas de lixiviación y existe dificultad para la incubación de microbios y es susceptible a contaminación, lo que limita su aplicación.

Las altas concentraciones de iones metálicos en la solución lixiviante son consideradas como peligrosas para las células, por lo que sólo se produce una solución de baja concentración de metales por biolixiviación. Se encontró que las tasas de lixiviación de litio y cobalto se redujeron del 72 % al 37 % y del 89 % al 10 %, respectivamente, con el incremento de las densidades de la pulpa del 2 % al 4 % (Niu et al., 2014). La baja concentración de metales de soluciones de lixiviantes lleva a dificultades en procesos posteriores. Para la biolixiviación se suelen usar bacterias y hongos. Los hongos producen ácidos orgánicos, mientras que las bacterias secretan ácidos inorgánicos.

Recuperación profunda

En esta etapa los metales valiosos en el lixiviado –cobalto, litio, níquel y manganeso– se separan y recuperan por medio de procesos de extracción por solventes, precipitación, métodos electroquímicos, separación por membranas y tamizado por absorbentes. Por lo general, se continúa con procesos de calcinación o cristalización con miras a producir productos de alta pureza para la regeneración de materiales de electrodos (Xing et al., 2023).

Extracción por solventes
El método de extracción por solventes suele emplearse para la recuperación profunda de metal. Con este objetivo, se utiliza un solvente altamente selectivo para extraer metales específicos del lixiviado. Tiene las desventajas de ser un método costoso y producir una gran cantidad de solvente de desecho, difícil de reusar y reciclar, lo que puede ser nocivo para el medio ambiente.

Durante la interacción líquido-líquido, los metales objetivo y otros elementos se concentran y separan en dos líquidos inmiscibles. Los metales deseados están presentes en líquidos asociados llamados solventes o extractantes. Se ha demostrado que este método es eficaz para la separación de metales debido a la gran selectividad del disolvente por iones metálicos dispares. Además, tiene la ventaja de generar productos de alta pureza en poco tiempo de reacción. Sin embargo, algunas limitaciones son la complejidad de la operación y el alto costo de los solventes. (Dobo et al., 2023).

Precipitación química

Este método se usa para separar y recuperar elementos de alto valor de soluciones de lixiviación. Puede precipitar metales valiosos y remover trazas de impurezas, incluyendo hierro, cobre y aluminio. El mecanismo de separación por precipitación química depende de la insolubilidad dispar de los compuestos metálicos bajo condiciones específicas de temperatura y pH, que deben ser ajustadas con cuidado en el proceso de precipitación. Los precipitantes más empleados son CO_3^{2-}, contenidos en sales como NH_4CO_3 y Na_2CO_3, ya que pueden formar compuestos insolubles, casi con todos los metales de alto valor, tales como: Mn^{2+}, Ni^{2+}, Co^{2+} y Li^{+}, además de otros precipitantes como Na_3PO_4, ácido fosfórico (H_3PO_4), oxalato de amoniaco $(NH_4)_2C_2O_4$ y ácido oxálico $H_2C_2O_4$. Las ventajas de este método son su bajo costo, bajo requerimiento de equipos y operación simple. La precipitación química se suele asociar a la extracción líquido-líquido para recuperar elementos de alto valor de soluciones de lixiviación intrincadas (Dobo et al., 2023).

Otros métodos

El método sol-gel recupera de forma directa sustancias catódicas de las soluciones de lixiviado de baterías gastadas. El lixiviado se somete al inicio a una serie de tratamientos para convertirlo en forma de gel y recuperar productos sólidos que incluyen: $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$ y LMO. Por su efecto quelante, el método sol-gel se suele asociar con ácidos orgánicos. Este método es amigable con el ambiente, además de simplificar la separación y recuperación, pero puede resultar costoso por el alto consumo de ácidos orgánicos y los tiempos de reacción. Se requieren sustancias adicionales para ajustar la composición del lixiviado para los prerrequisitos necesarios de las sustancias catódicas regeneradas (Dobo et al., 2023).

Otro método es la deposición electroquímica para separar metales objetivo del lixiviado de BIL gastadas, –principalmente el cobalto–, el cual se basa en la diferencia del potencial redox del ion metálico. Esta técnica, junto con la de intercambio iónico y electrodiálisis son restrictivas debido a la complejidad de operaciones y altos costos (Dobo et al., 2023). La electrodiálisis es una tecnología prometedora, ya que es selectiva, eficiente y amigable con el ambiente. Se trata de un método de separación electroquímica modificado con membranas de intercambio iónico, en el que, se aplica un campo eléctrico de corriente directa para que los iones positivos sean conducidos al cátodo y los iones negativos al ánodo. Las membranas de intercambio iónico separan los iones en el líquido al bloquear coiones con cargas similares al grupo funcional de la membrana, mientras que permite el paso de iones con cargas opuestas a través de ella. Este proceso usa pocos químicos, tiene alta eficiencia para separación de compuestos en baja concentración y consume menos energía comparado con el proceso de extracción por solventes (Xing et al., 2023).

TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Para determinar las condiciones óptimas de los procesos extractivos de litio, se deben conocer las propiedades químicas de los productos obtenidos durante las diferentes etapas de la ruta extractiva. Por tal motivo, es importante implementar algunas herramientas analíticas que permitan determinar las concentraciones químicas y estructuras de los elementos y compuestos obtenidos, tales como lixiviados y sales de litio.

Algunas de las herramientas utilizadas para la caracterización química de compuestos se describen a continuación.

Difracción de rayos X **(*DRX*)**

Esta técnica permite la identificación de las fases cristalinas presentes, a partir del patrón de difracción característico. Además, hace posible evaluar las diferentes formas cristalinas de un mineral, así como la textura cristalográfica que corresponde a la orientación preferencial de los cristales, a su tamaño y parámetros de red. Al mismo tiempo, con esta herramienta se puede obtener información de los esfuerzos residuales y determinar si existe alguna deformación en la red cristalina, inducidos posiblemente por procesos de meteorización del mineral (Pozo, 2019).

Debido a que los rayos X poseen longitudes de onda del mismo orden de magnitud que los radios atómicos, al entrar en contacto con un material cristalino, los rayos son difractados por los electrones que rodean los átomos de la muestra por analizar, produciendo un patrón de difracción característico que, al ser estudiado y refinado, permite el conocimiento de la posición, estructura y composición de las fases cristalinas constitutivas del material. Esta interacción crea una gráfica denominada difractograma, que presenta una serie de picos, en la que en el eje "x" se muestra el ángulo 2θ y en el

eje “y” se cuantifica la intensidad del pico refractado. Al conocer la longitud de onda de los rayos X y el valor del ángulo de difracción, se puede determinar el valor del espaciado (dÅ). El conjunto de espaciados y su intensidad son los criterios empleados para la identificación de los minerales constituyentes de la muestra, ya sea mediante tablas de identificación o a través del empleo de programas informáticos de análisis mineral (Melgarejo, 2010).

Fluorescencia de rayos X (*FRX*)
Esta técnica permite medir la concentración de elementos en una muestra. Se basa en el paso de electrones entre átomos cuando un objeto ha sido excitado al someterlo a radiación, en este caso: rayos X. La energía incidente en el material produce alteraciones en los diferentes estados de energía de cada átomo, únicos en cada caso, que permiten la determinación del analito en estudio.

Esta técnica consiste en la emisión de rayos X secundarios –o fluorescentes– característicos de cada material que haya sido excitado al ser bombardeado con rayos X de alta energía. Se utiliza a menudo en análisis químicos, en particular en la investigación de metales y minerales (Ardila et al., 2018).

Análisis de termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido
Esta técnica evalúa la pérdida o ganancia de masa de un mineral expuesto a un ciclo de calentamiento, y permite analizar procesos de transformación con pérdida de peso.

La técnica de termogravimetría se basa en la modificación en el peso que experimenta una muestra durante su calentamiento/enfriamiento controlado dentro de un horno. Así, se pueden registrar las pérdidas de masa por la evaporación de agua o disolventes, pirólisis o descarboxilación. Además, si la atmósfera es oxidante, se podrán registrar incrementos de masa debidos a los fenómenos de oxidación que se presenten.

La calorimetría diferencial de barrido presenta la variación de entalpía entre la muestra y un material inerte de referencia en función de la temperatura o del tiempo, lo que permite determinar calores específicos, puntos de ebullición y cristalización, pureza de compuestos cristalinos y entalpías de reacción. Estas determinaciones son fundamentales para cualquier tratamiento térmico al que sea sometido la muestra (Ardila et al., 2018).

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido es una técnica que permite la observación y caracterización superficial de materiales minerales, entregando información morfológica del material analizado. Con este método, se producen distintos tipos de señales que se generan desde la muestra y que son utilizados para examinar sus características. La microscopía electrónica de barrido utiliza un haz de electrones que bombardean la muestra, y ésta, en respuesta, emite partículas como electrones secundarios y retro dispersados, que serán recibidos por un detector para formar una imagen (Ardila et al., 2018).

Esta técnica se basa en la obtención de una imagen de la muestra a partir de su barrido con un haz de electrones, como resultado de las interacciones entre los electrones incidentes y la muestra. Las

interacciones entre ambos originan electrones secundarios, electrones retro dispersados y rayos X característicos de los elementos presentes en la muestra. En el meb diferentes detectores amplifican la señal emitida por la superficie de la muestra cuando es barrida por un delgado haz de electrones. La intensidad de la señal amplificada se visualiza en una pantalla (Melgarejo et al., 2010).

Espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS)

Esta técnica se fundamenta en la formación de un plasma que se obtiene mediante la focalización de una intensa radiación láser sobre una muestra hasta producir su ruptura dieléctrica. Esta ruptura inducida por el láser puede definirse como la generación de un gas parcialmente ionizado tras la acción de un pulso láser, que se conoce como plasma.

De esta forma, cuando un haz láser incide sobre un material, parte de la radiación se pierde por reflexión, conducción térmica o convección, pero gran parte de esa energía es absorbida y empleada en calentar y superar el calor latente de fusión, vaporización y atomización. Cuando el pulso láser termina, el sistema pierde energía con rapidez, con lo cual se forma una gran cantidad de átomos excitados. La captura de la luz emitida por la pluma en este momento permite la detección de especies.

El plasma pierde energía hasta que desaparece y quedan sólo las partículas en suspensión, que pueden ser transportadas para su análisis mediante otras técnicas como espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) (Lacarte et al., 2010).

INNOVACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS RUTAS DE EXTRACCIÓN DE LITIO EN MÉXICO

Después de explorar en diversas partes de la república, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) ha encontrado depósitos de litio en 14 de las 32 entidades del país. De estos, el depósito más grande e importante se encuentra en el estado de Sonora. Los hallazgos de litio en dicho estado corresponden a sucesiones vulcanosedimentarias con minerales de arcillas. Por su parte, la Oficina de Minas de los Estados Unidos reporta que la cantidad de litio contenido en las arcillas de Sonora coloca a México en el décimo lugar a nivel mundial en términos de reservas de este metal (USGS, 2024).

Sin embargo, poco se sabe del procesamiento de arcillas con contenidos de litio. Como se ha mencionado en este capítulo, los salares y salmueras son las fuentes naturales de litio más explotadas, seguidas por la extracción de litio a partir de roca. Para el caso de las arcillas con contenidos de litio, no se ha reportado ninguna operación comercial exitosa en su recuperación en el mundo.

PROYECTO DE BENEFICIO Y METALURGIA EXTRACTIVA DE LITIO CONAHCYT

En vista de la nacionalización del litio, como parte de los esfuerzos del Gobierno de México para su aprovechamiento soberano, desde el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) se está llevando a cabo la articulación de diferentes instituciones para la realización del proyecto *Beneficio y metalurgia extractiva de productos de litio*, con el objetivo de establecer los procesos específicos para la extracción de litio en arcillas de afloramientos mexicanos.

Entre las instituciones participantes, el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Cimav) lidera la colaboración entre el Centro de Tecnología Avanzada (Ciateq), la Universidad Autónoma de San Luis

Potosí (UASLP), el Servicio Geológico Mexicano (SGM) y Litio para México (LitioMx), orientada a la definición de los procesos óptimos de extracción de litio de arcillas de México.

En el contexto de la generación de conocimiento de frontera y desarrollos tecnológicos nacionales, como parte del proyecto se están llevando a cabo las siguientes acciones:

1. *Pruebas de extracción en laboratorio.* Con la colaboración de diferentes centros de investigación e instituciones de educación superior nacionales, se realizaron las pruebas necesarias para determinar las propiedades de las muestras proporcionadas; con base en ello, se definieron los procesos de extracción de litio específicos para estos minerales.
2. *Definición de compromisos sociales y ambientales.* Se promueve la innovación en los procesos de beneficio y metalurgia extractiva de litio para mantener un equilibrio ecológico y en beneficio de las y los mexicanos.
3. *Identificación de los procesos de beneficio y metalurgia extractiva de litio en México.* A partir del conocimiento generado durante la etapa de pruebas de laboratorio, se identificaron los procesos más eficientes, económicos, seguros, productivos y con el menor impacto ambiental para la extracción de sales de litio de minerales en México.
4. *Adecuación y puesta en marcha de una planta piloto.* A través de la identificación del proceso óptimo de extracción de litio de arcillas, próximamente se impulsará la puesta en marcha de una planta piloto, la cual será diseñada con el objetivo de producir sales de litio de manera continua.
5. *Establecimiento de los parámetros para el escalamiento industrial.* De 2025 a 2030 se desarrollarán y optimizarán las distintas rutas metalúrgicas que sentarán las bases para el futuro diseño y construcción de una planta industrial para la extracción de litio

a partir de minerales nacionales. Estas rutas incluyen la optimización de recursos energéticos e hídricos de la región.

AVANCES EN CONOCIMIENTO DE RUTAS EXTRACTIVAS DE LITIO DE ARCILLAS DE MÉXICO

La obtención de litio de arcillas supone procesos y operaciones unitarias de mayor complejidad, en comparación con los que se utilizan en el procesamiento de salmueras y rocas duras. Esto se debe a que, por un lado, las especies minerales que contienen litio están asociadas con elementos altamente reactivos como el sodio, el potasio y el calcio, entre otros. Por otro lado, la misma estructura del mineral dificulta la extracción, ya que se trata de un silicato (SiO_4), por lo que la arcilla misma se debe eliminar antes de poder extraer el litio.

Estudios realizados en arcillas con contenidos de litio en distintas regiones del planeta (Aylmore et al., 2018; Foster, 1960; Tindle y Webb, 1990) han demostrado la interrelación que existe entre las diferentes especies minerales contenidas en arcillas. La tabla 4 presenta las especies de litio más representativas en arcillas con contenidos de este metal.

Tabla 4. Especies minerales de litio encontradas en arcillas

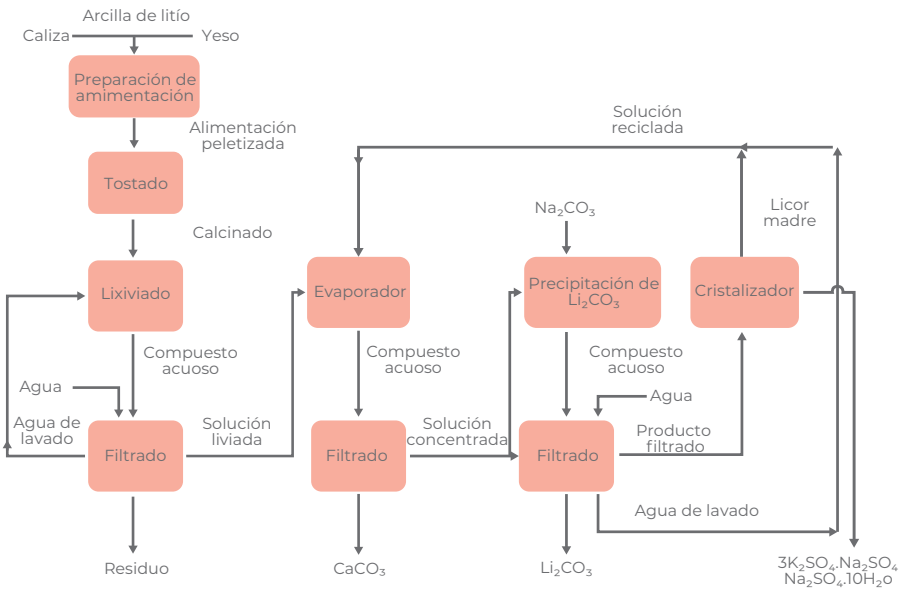
ESPECIE MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	NOTAS	CONTENIDO DE LITIO ($\%Li_2O$)
Lepidolita	$K[Li_{2-x}Al_{1+x}(Al_{2x}Si_{4-2x}O_{10})(OH,F)_2]$	x = 0 – 0.5	1.2 – 5.9
Polilitionita	$KLi_2Al(Si_4O_{10})(F,OH)_2$		7.04
Trilitionita	$K(Li_{1.5}Al_{1.5})(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$		5.17
Zinnwaldita	$K[(Li,Fe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH,F)_2]$		2 -3
Masutomilita	$K[Li_{1+x}(Mn^{2+}Fe^{2+})_{1-x}Al(Al_{1-x}Si_{3+x}O_{10})F_{1+x}(OH)_{1-x}]$	x = 0 – 0.5	3.5 – 5.0
Swinefordita	$(Li,Ca,Na)_{1-x}(H_2O)_4[(Al,Li,Mg)_{2+x}(Si,Al)_4Si_3O_{10}(OH,F)_2]$	x < 1.0	4.2 – 5.7
Hectorita	$(Ca_{0.5}Na)_x(H_2O)_4[(Mg_{3-x}Li)_3Si_4O_{10}(OH,F)_2]$	x~0.33	1.1 -1.3
Cookeita	$LiAl_2(OH)_6Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$		2.4 – 4.1

ESPECIE MINERAL	FÓRMULA QUÍMICA	NOTAS	CONTENIDO DE LITIO ($\%Li_2O$)
Jadarita	$LiNaSiB_3O_7(OH)$		7.3

Fuente: elaboración propia con base en Aylmore y colaboradores (2018), Foster (1960), así como Tindle y Webb (1990).

De las especies citadas en la tabla 4, la zinnwaldita difiere de las otras especies, principalmente por el estado de oxidación del hierro (Brigatti y Guggenheim, 2002, Brigatti et al., 2007). El litio se aloja en los sitios octaédricos que se forman a lo largo de la estructura de las arcillas (Brigatti y Guggenheim, 2002; Brigatti et al., 2007; Zhao et al., 2023).

Figura 26. Diagrama del flujo general de la extracción de litio en arcillas



Fuente: elaboración propia adaptado de Lien (1985).

De acuerdo con Lien (1985), una forma sencilla de extraer el litio contenido en arcillas montmorilloniticas es a partir de la tostación con sulfatos,

seguida de lixiviación con agua y cristalización/precipitación del carbonato de litio (figura 26). El proceso propuesto por Lien reporta la recuperación de hasta el 82% del litio contenido en la arcilla como carbonato con pureza de hasta el 99%.

Tomando como base la información publicada por Lien (1985), el Cimav propuso un programa experimental para generar un proceso de extracción de litio en arcillas de afloramientos de México. Con este propósito, se trataron y caracterizaron fisicoquímicamente muestras de arcillas, determinando la asociación mineralógica presente en ellas, con lo que se inició la experimentación para definir la mejor ruta metalúrgica para la recuperación de litio, con la cual, se ha obtenido carbonato de litio de alta pureza.

PERFIL DE TALENTO ESPECIALIZADO PARA EL BENEFICIO Y METALURGIA EXTRACTIVA DE LITIO

Para el proceso de metalurgia extractiva a escala industrial, se requiere personal con la formación necesaria para afrontar retos específicos en las etapas de procesamiento de arcillas.

A continuación, se describen las características del personal que se encargaría de realizar las actividades y procesos necesarios para la extracción de sales de litio de arcillas. Las etapas corresponden a explotación minera, operación de planta de beneficios y un área de investigación y desarrollo.

Para la etapa de explotación minera se considera una operación de *tajo*, sin la necesidad de voladuras con explosivos, utilizando maquinaria como: rectroexcavadoras, topadores, perforadoras, camiones, cargadores frontales y posiblemente palas hidráulicas. En la planta de beneficios se tendría la operación de trituración, molienda, calcinación, lixiviación, precipitación y purificación.

También, se propone contar con un área de investigación y desarrollo para asegurar la búsqueda continua de mejora de procesos extractivos.

En las siguientes tablas se muestran los perfiles de talento especializado requeridos para las áreas mencionadas.

Tabla 5. Perfil de talento especializado para explotación minera

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS RELACIONADOS Y HABILIDADES
Operación	Educación básica	Operación de maquinaria y equipo pesado Normas de seguridad en la operación de maquinaria
Técnico	TSU en minería Ing. industrial Ing. en metalurgia y materiales Ing. de minas y metalurgia Ing. ambiental	Normas de seguridad industrial Procesos de explotación de minerales en mina de tajo Técnicas de caracterización de materiales (MEB, DRX, ICP, AA) Normas de cuidado ambiental
Licenciatura - ingeniería	Ing. industrial Ing. en metalurgia y materiales Ing. de minas y metalurgia Ing. geólogo Ing. ambiental	Normas de seguridad industrial Procesos de explotación de minerales en mina de tajo Procesos de metalurgia extractiva Técnicas de caracterización de minerales (MEB, DRX, ICP, AA) Logística de manejo de minerales Manejo de KPI
Direcciones y gerencias de operación minera	Maestría / Doctorado en minas Maestría / Doctorado en metalurgia y materiales Maestría en administración Maestría / doctorado en Ing. ambiental	Estrategias para el desarrollo sustentable de proyectos de explotación de la mina Proyectos de mejora de procesos Análisis y búsqueda de información de procesos de explotación de mina innovadores Administración

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Perfil de talento especializado para la planta de beneficio

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS RELACIONADOS Y HABILIDADES
Operación	Educación básica	Operación de maquinaria y equipo pesado Normas de seguridad industrial

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS RELACIONADOS Y HABILIDADES
Técnico	TSU en minería Ing. industrial Ing. en metalurgia y materiales Ing. de minas y metalurgia Ing. ambiental	Normas de seguridad industrial Procesos de metalurgia extractiva Técnicas de caracterización de materiales (MEB, DRX, ICP, AA) Normas de cuidado ambientales
Licenciatura - ingeniería	Ing. industrial Ing. en metalurgia y materiales Ing. de minas y metalurgia Ing. geólogo Ing. ambiental	Normas de seguridad industrial Procesos de metalurgia extractiva Técnicas de caracterización de materiales (MEB, DRX, ICP, AA) Manejo de KPI Operaciones unitarias (molienda, calcinación, lixiviación)
Direcciones y gerencias de planta de beneficio	Maestría / Doctorado en minas Maestría / Doctorado en metalurgia y materiales Maestría en administración Maestría / doctorado en ing. ambiental	Estrategias para el desarrollo sustentable de proyectos de metalurgia extractiva de productos de litio Proyectos de mejora de procesos Análisis y búsqueda de información de procesos de metalurgia extractiva de litio de minerales que lo contienen innovadores Diseño de ensayos de metalurgia extractiva Administración

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Perfil de talento especializado para el área de investigación y desarrollo

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS RELACIONADOS Y HABILIDADES
Técnicos de laboratorio	TSU en metalurgia Ing. en metalurgia y materiales Ing. químico	Técnicas de caracterización de materiales Normas de seguridad industrial Normas de cuidado ambiental Procesos de metalurgia extractiva Operaciones unitarias
Desarrollo de procesos	Maestría / Doctorado en minas Maestría / Doctorado en metalurgia y materiales Maestría en administración Maestría / doctorado en ing. ambiental	Proyectos de mejora de procesos Análisis y búsqueda de información de procesos innovadores de metalurgia extractiva de litio de minerales que lo contienen Diseño de ensayos de metalurgia extractiva

Fuente: elaboración propia.

CONSIDERACIONES FINALES

Existen diferentes rutas y procesos metalúrgicos para la extracción de litio, definidas en función del tipo de mineral que lo contiene, incluyendo operaciones de extracción de salmueras y salares, rocas duras –pegmatitas–, arcillas y fuentes emergentes.

De estos tipos de minerales, las arcillas son los más abundantes en México, por lo que es muy importante definir los procesos metalúrgicos para producir sales de litio de alto valor a partir de arcillas, de las cuales, no existe aún un proceso extractivo implementado a nivel industrial en el mundo.

En este sentido, el Conahcyt coordinó e impulsó los esfuerzos para diseñar los procesos metalúrgicos para obtener carbonato de litio de alta pureza a partir de arcillas de México, mediante la articulación de centros públicos e instituciones de educación superior. Gracias a estos esfuerzos se definieron procesos extractivos innovadores y cuidadosos del medio ambiente, al requerir menores consumos de agua y energía, sin la necesidad de utilizar sustancias nocivas; en contraste con los procesos convencionales de extracción de litio, superando los retos tecnológicos asociados a las características inherentes a las arcillas, como lo es la gran variabilidad de propiedades físicas y químicas de este tipo de minerales

A partir de la definición de los procesos metalúrgicos de extracción de litio de minerales de arcillas, se adecuará y pondrá en marcha una planta piloto, con la capacidad de obtener carbonato de litio de alta pureza de manera continua, lo que permitirá sentar las bases para la creación de una industria nacional de producción de sales de litio de minerales de México.

REFERENCIAS

An, L. (ed.) (2019). *Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries*. Springer International Publishing.

Averill, W. y Olson, D. (1977). A review of extractive processes for lithium from ores and brines. *Energy*, *3*, 305–313.

Aylmore, M., Merigot, K., Quadir, Z., Rickard, W., Evans, N., McDonald, B. y Spitalny, P. (2018). Applications of advanced analytical and mass spectrometry techniques to the characterisation of micaceous lithium-bearing ores. *Minerals Engineering*, 116, https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.004, 182–195.

Barik, S.P., Prabaharan, C. y Kumar, L. (2017). Leaching and separation of CO and MN from electrode materials of spent lithium-ion batteries using hydrochloric acid: Laboratory and pilot scale study. *Journal of Cleaner Production*, 147, 37–43, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.095,

Bingoto, P., Foucart, M., Gusakova, M., Hundertmark, T. y Van Hoey, M. (2023), *The Net-Zero Materials Transition: Implications for Global Supply Chains:*, McKinsey & Co.

Brigatti, M. y Guggenheim, F. (2002). Mica crystal chemistry and the influence of pressure, temperature, and solid solution on atomistic models. Reviews in *Mineralogy and Geochemistry*, *46*(1): 1–97. https://doi.org/10.2138/rmg.2002.46.01

Brigatti, M., Mottana, A., Malferrari, D. y Cibin, G. (2007). Crystal structure and chemical composition of Li-, Fe-, and Mn-rich micas. *American Mineralogist*, *92*(8–9), 1395–1400. https://doi.org/10.2138/am.2007.2497

Chagnes, A. y Pospiech, B. (2013). A brief review on hydrometallurgical technologies for recycling spent lithium-ion batteries. *Journal of Chemical Technology and Biotechnolgy. 88*(7), 1191–1199 https://doi.org/10.1002/jctb.4053.

Changes, A. y Świątowska, J. (2015). *Lithium Process Chemistry Resources, Extraction, Batteries and Recycling.* Elsevier.

Chen, M. et al., (2019b), Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries. *Joule*, *3*(11), 2622–2646, (http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.014)

Chen, X., Li, J., Kang, D., Zhou, T. y Ma, H. (2019a). A novel closed-loop process for the simultaneous recovery of valuable metals and iron from a mixed type of spent lithium-ion batteries. *Green Chemistry*, *21*(23), 6342–6352 http: //dx.doi.org/10.1039/C9GC02844G.

Choubey, P., Chung, K., Kim, M., Lee, J. y Srivastava, R. (2017). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element Lithium. Part II: From sea water and spent lithium ion batteries (LIBs): *Minerals Engineering*, *110*, 104–121.

Choubey, P., Kim, M., Srivastava, R., Lee, J. C. y Lee, J. Y. (2016). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources: *Minerals Engineering*, *89*, 119–137.

Cognet, M., Condomines, J., Cambedouzou, J., Madhavi, S., Carboni, M. y Meyer, D. (2014). An original recycling method for li-ion batteries through large scale production of metal organic frameworks. *Journal of Hazardous Materials*, *385*, 121603. (http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121603.).

Dobó, Z., Dinh, T. y Kulcsár, T. (2023). A review on recycling of spent lithium-ion batteries. *Energy Reports*, *9*, 6362–6395.

Fan, X. et al. (2021). Separation and recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries via concentrated sulfuric acid leaching and regeneration of LiNi1/3Co1/3Mn1/3O2 *Journal of Alloys and Compounds*, *863*, 158775, http://dx.doi.org/10. 1016/j.jallcom.2021.158775

Foster, M.D. (1960). Interpretation of the composition of lithium micas. *Geological Survey Professional Paper, 354*. 354-E. United States Government Printing Office.

Fuentealba, D., Flores, C., Troncoso, E. y Estay, H. (2023). Technological tendencies for lithium production from salt lake brines: Progress and research gaps to move towards more sustainable processes. *Resources Policy*, *83*, 103572. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103572

Fuentes, L., Reyes, M. (2002). *Mineralogía Analítica*. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Gao, T., Fan, N., Chen, W. y Dai, T. (2023). Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost. *China Geology*, *6*, 137–153.

Gao, W. Liu,C. M., Cao, H. B., Zheng, X. H.,Lin, X., Wang, H. J., Zhang, Y. y Sun, Z. (2018). Comprehensive evaluation on effective leaching of

critical metals from spent lithium-ion batteries. *Waste Manage, 75*, 477–485. http: //dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.023.

Garret, D., (2004), *Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride*. Elsevier.

Gielen, D., (2021), *Critical materials for energy transition*, International Renewable Energy Agency.

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Drscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L. y Andrson, P. (2019), Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575, 75–86. http://dx.doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5

HSC Chemistry, (2021), *Chemistry*, 10

International Energy Agency (IEA) (2022). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions

Jamasmie, C. (2023). *Lithium Americas produces first carbonate at Caucharí-Olaroz*. https://www.mining.com/lithium-americas-produces-first-carbonate-at-argentinas-cauchari-olaroz/

Jian, Y.Zongliang, Z., Gang, Z. y Liangxing, J. (2021). Process study of chloride roasting and water leaching for the extraction of valuable metals from spent lithium-ion batteries: *Hydrometallurgy, 203*(6), 105638 https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105638

Jorquera, C. (2021) *Revisión de tecnologías para la extracción de litio a partir de salmueras geotérmicas* https://www.piensageotermia.com/revision-de-tecnologias-para-la-extraccion-de-litio-a-partir-de-salmueras-geotermicas

Kamran, M., Raugei, M. y Hutchinson, A., (2023), Critical elements for a successful energy transition: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Transition. 4*, 100068. https://doi.org/10.1016/j.rset.2023.100068

Khakmardan, S., Rolinck, M., Cerdas, F., Herrmann, C., Giurco, D., Crawford, R. y Li, W. (2023). Comparative life cycle assessment of lithium mining, extraction and refining technologies: a global perspective. *Procedia CIRP, 116*, 606–611.

Kölbel, L., Kölbel, T., Hermann, L., Kaymakci, E., Ghergut, J., Poirel, A. y Schneider, J. (2023). Lithium extraction from geothermal brines in

the Upper Rhine Graben: A case of study of potential and current state of the art. *Hydrometallurgy*, *221*, 106131. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106131

Kong, Y., Takaya, Y., Córdova, M. y Tokoro, C. (2023). Simple and efficient selective extraction of lithium from spent ternary lithium-ion batteries via oxidation / de-lithiation using NaClO. *Separation and Purification Technology*, 322, 1224280. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124280

Kuang, Y., Liu, S., Xhing, F., Li, F. y Guo, H. (2018). Extraction of lithium from β-spodumene using sodium sulfate solution. *Hydrometallurgy*, *177*, 49–56.

Kubaschewski, O. y Alcock, C.B. (1983). *Metallurgical Thermochemistry (International Series on Materials Science and Technology)*. Pergamon Press.

Lacarte, J., Lasheras, R. y Bello, C. (2010). Espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS): una técnica emergente en la química analítica. *Scientific Journal from the Experimental Faculty of Sciences, at the Universidad del Zulia*, *18*(3), 22-25.

Li, Y.L., Miao, W.L., He, M.Y., Li, C.Z., Gu, H.E. y Zhang, X.Y. (2023). Origin of lithium-rich salt lakes on the western Kunlun Mountains of the Tíbetan Plateau: Evidence from hydrogeochemistry and lithium isotopes: *Ore Geology Reviews*, *155*(01), 105356. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105356

Li, J., Yang, X., Fu, Y., Huang, H., Zhong, Z. y Wang, Y. (2019). Recovery of Fe, Mn, Ni and Co in sulfuric acid leaching liquor of spent lithium ion batteries for synthesis of lithium ion-sieve and NixCoyMn1-x-y(OH)2: *Hydrometallurgy*, *190*, 105190. http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105190

Lida, T., Kita, Y., Katayama, T., Tanaka, T. y Okano, H. (1992). An equation for the Vapor Pressure of Liquid Metals and Calculation of Their Entalphies of Evaporation. *High Temperature Materials and Processes*, *10*(4), 199–208.

Lide, D.R. (ed.). (2003). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press.

Lien, R.H. (1985), *Recovery of Lithium from a Montmorillonite-Type Clay*. Bureau of Mines Report of Investigations. United States Department of the Interior.

Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y. y Sun, Z. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 801–813. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.304

Liu, Y., Ma, B., Lü, Y., Wang, C. y Chen, Y. (2023). A review of lithium extraction from natural resources. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, *30*, 209–224.

Lv, W., Wang, Z., Cao, H., Sun, Y., Zhang, Y. y Sun, Z. (2018). A critical review and analysis on the recycling of spent lithium-ion batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *6*(2), 1504–1521. http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03811

Makuza, B., Tian, Q., Guo, X., Chattopadhyay, K. y Yu, D. (2021). Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Journal of Power Sources*, *491*, 229622 (http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021. 229622.).

Martin, G., Rentsch, L., Höck, M. y Bertau, M. (2023). Lithium market research – global supply, future demand and price development. *Energy Storage Mater*, *6*(4), 171–179.

Melgarejo, J., Proenza, J., Galí, S. y Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y exploración minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *62*(1), 1-23.

Mends, E. y Chu, P. (2023). Lithium extraction from unconventional aqueous resources – A review on recent thecnological developement for seawater and geothermal brine. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*, (110710).

Menéndez, M., Vidal, A., Toraño, J. y Gent, M. (2004). Optimization of spodumene flotation. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, *4*(2), 130–135.

Meshram, P., Pandey, B.D. y Mankhand, T.R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometrallurgy*, *150*, 192–208.

Mineral Commodity Summaries. (2024). USGS, 110–111

Niu, Z., Zou, Y., Xin, B., Chen, C., Liu, C. y Li, Y. (2014). Process controls for improving bioleaching performance of both Li and Co from spent lithium ion batteries at high pulp density and its thermodynamics and kinetics exploration: *Chemosphere*, *109*, 92–98. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02. 059

Pozo, M. (2019). El papel de la caracterización mineralógica y geoquímica en el estudio de las culturas antiguas: ejemplos de excavaciones españolas en oriente: *ISIMU. Revista sobre Oriente Próximo y Egipto en la antigüedad*, *22*, 94–106.

Rosales, G., Ruiz, M. y Rodriguez, M. (2014). Novel process for the extraction of lithium from β-spodumene by leaching with HF. *Hydrometallurgy*, *147*-148, 1–6.

S. a. (s/f) *Difracción de Rayos X* (XRD). https://www.rigaku.com/es/techniques/x-ray-diffraction-xrd.

S. a. (2023) *The world's ten largest lithium mines*. https://www.mining-technology.com/marketdata/ten-largest-lithiums-mines/?cf-view

Schenker, V., Oberschelp, C. y Pfister, S. (2022). Regionalized life cycle assessment of present and future lithium production for Li–ion batteries. *Resources, Conservation & Recycling*, *187* (106611).

Shi, J. et al. (2019), Sulfation roasting mechanism for spent lithium-ion battery metal oxides under SO2-O2-Ar atmosphere. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, *71*(12), 1-10 https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-019-03800-5

Simon, B., Ziemann, S. y Weil, M. (2015). Potential metal requierement of active materials in lithium-ion battery cells of electric vehicles and its impact on reserves: Focus on Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, *104*(A), 300–310.

Tabelin, C., Dallas, J., Casanova, S., Pelech, T., Bournival, C., Saydam, S. y Canbulat, I. (2021). Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives. *Minerals Engineering*, *163*(1-4), 106743

Talens, L., Villalba, G. y Ayres, R. (2009). Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, *65*(8)

Tindle, A.G. y Webb, P.C. (1990). Estimation of lithium contents in trioctahedral micas using microprobe data: application to micas from granitic rocks.*European Journal of Mineralogy*, *2*(5), 595–610, https://doi.org/10.1127/ejm/2/5/0595

Toba, A., Nguyen, R., Cole, C., Neupane, G. y Paranthaman, M. (2021). US lithium resources from geothermal and extraction feasability. *Resources, Conservation & Recycling*, *169*(1005514).

Vera, E., López, A., Pineda, Y., Useda, O., Peña, G., Daza, O., Lazcano, L. y Ardila, M. (2018). *Caracterización, beneficio y usos potenciales de minerales estratégicos del departamento de Boyacá*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 17–30

Wang, W., Zhang, C. y Zhang, F. (2017). Recycling of spent lithium-ion battery with polyvinyl chloride by mechanochemical process. *Waste Management*, *67*, 232–239.

Windisch-Kern, S., Gerold, E., Nigl, T. P., Jandric, A., Altendorfer, M., Rutrecht, B., Scherhaufer, S., Raupenstrauch, H., Pomberger, R., Antrekowitsch, H., y Part, F. (2022). Recycling chains for lithium-ion batteries: *A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. Waste Management*, *138*, 125–139.

Wu, XF., Yin, Z., Li, XH., Wang, Z. y Guo, H. (2012). Extraction of lithium and postassium from Yichun lepidolite. *Mining and Metallurgical Engineering*, *32*(3), 95–98.

Xing, X. y Srinivasan, M. (2023). Lithium recovery from spent lithium-ion battery leachate by chelating agents facilitated electrodialysis. *Chemical Engineeering Journal*, *474*(145306).

Xuan, W., Otsuki, A. y Chagnes, A. (2019). Investigation of the leaching mechanism of nmc 811 (LiNi 0.8 Mn 0.1 Co 0.1 O 2) by hydrochloric acid for recycling lithium ion battery cathodes. *RSC Advances*, *2019*(9), 38612.

Yaksic, A. y Tilton, J. (2009). Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *Resources Policy*, *34*, 185–194.

Yun, L., Linh, D., Shui, L., Peng, X.,Garg, A.,Loan, M., Phung L., Asghari, S. y Sandoval, J. (2018). Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles: *Resources, Conservation and Recycling*, *136*, 198–208. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.025

Zeng, H. y Li, J. (2013). Implications for the carrying capacity of lithium reserve in China: *Resources, Conservation and Recycling*, *80*, 218–231.

Zhang, J., Hu, J., Zhang, W., Chen, Y., Liu, C. y Wang, C. (2018). Efficient and economical recovery of lithium, cobalt, nickel, manganese from cathode scrap of spent lithium-ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, *204*, 437–446. http://dx.doi.org/10.1016/ j.jclepro.2018.09.033

Zhang, Y., Wang, W., Fang, Q. y Xu, S. (2020a). Improved recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by efficient reduction roasting and facile acid leaching. *Waste Management*, *102*(9), 847-855. http://dx.doi.org/10.1016/ j.wasman.2019.11.045

Zhang, Y., Wang, W., Hu, J., Zhang, T. y Xu, S. (2020b). Stepwise recovery of valuable metals from spent lithium ion batteries by controllable reduction and selective leaching and precipitation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(41), 15496-15506 http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04106

Zhao, H., Wang, Y. y Cheng, H. (2023). Recent advances in lithium extraction from lithium-bearing clay minerals. *Hydrometallurgy*, *217*(106025).

Zhu, ZH., Zhu, XM., Wen, Q., Zhuge, Q. y Ling, BP. (2008). Progress in production process of lithium carbonate. *Journal of Salt Lake Research*, *16*(3), 64–72.

4. Baterías de ion litio

RESUMEN Y MAPA DE RUTA

En este capítulo se presenta un análisis del estado actual de las baterías de ion litio (BIL), la primera sección aborda los fundamentos de su funcionamiento, su impacto socioeconómico y su importancia para el desarrollo sustentable en materia de energía, además, se presenta la prospectiva de la tecnología BIL y las oportunidades más importantes en diferentes sectores energéticos, tales como la movilidad eléctrica y el almacenamiento estacionario.

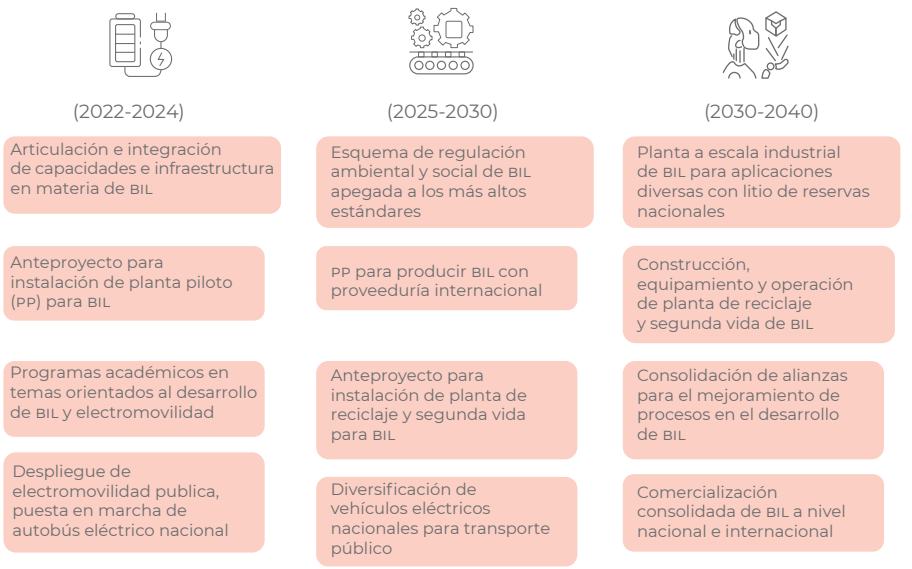
En la segunda sección se exploran los factores críticos de la cadena de valor de las baterías. A su vez, se describe la importancia de las sales y compuestos estratégicos de litio, así como los compuestos imprescindibles para detonar la fabricación de baterías en México. En seguida, se aborda la importancia de los materiales activos como componentes críticos para la fabricación de electrodos, y se hace énfasis en la síntesis de fosfato de litio y hierro (LFP) como compuesto prioritario para la fabricación soberana de BIL. Por último, se describen sus etapas de fabricación, niveles de escalamiento y las dos estrategias para establecer una economía circular alrededor de las baterías usadas, para darles un destino alternativo, para que beneficien a la población mexicana.

En la tercera sección se presenta la estrategia para la identificación y reconocimiento de fortalezas en investigación, desarrollo tecnológico e innovación. El objetivo es establecer una estrategia de articulación de

múltiples actores para implementar la industria de BIL en el corto y mediano plazo, mediante la cual se favorezca la soberanía tecnológica en el sector. En tal sentido, se mencionan las contribuciones de instituciones identificadas para fortalecer y coadyuvar a la fabricación de BIL, y se describen las consideraciones para la articulación internacional regional con la finalidad de determinar socios estratégicos para el intercambio de proveeduría de insumos esenciales para dicha fabricación.

En la cuarta sección se describen las fortalezas de México en investigación, desarrollo tecnológico e innovación para acelerar el conocimiento y desarrollo de tecnología alrededor de las BIL. Por último, se presenta una propuesta de los perfiles de talento especializado que se podrían insertar en la cadena de valor de BIL.

Figura 1. Mapa de ruta para detonar la fabricación de baterías de ion de litio en México durante el periodo 2023-2050



Fuente: elaboración propia.
Nota: Iconos realizados por Pixel perfect de www.flaticon.com

MAPA DE RUTA

En el mapa de ruta de la producción de las BIL (figura 1) se presenta la estrategia nacional a seguir para detonar la fabricación de las BIL como una tecnología que brindará soberanía al Gobierno de México en materia de energía.

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos principales del Gobierno de México es la industrialización de litio identificado en las reservas comprobadas y descritas en el capítulo 2. El litio, como se describió antes, tiene diferentes aplicaciones, pero como mineral estratégico es prioritario su uso para fabricar baterías de litio BIL recargables. Las baterías, como sistemas de almacenamiento de energía, son esenciales para energizar diferentes dispositivos de uso común.

Las BIL, que se desarrollaron a nivel comercial para la electrónica portátil, están hoy en la vida cotidiana en aplicaciones cada vez más diversas. Por un lado, energizan dispositivos electrónicos tales como computadoras portátiles, teléfonos celulares, dispositivos médicos, relojes inteligentes, drones, satélites y herramientas. Por otro lado, hacen posible el almacenamiento en red a escala de servicios públicos y aplicaciones de micro-movilidad —como sillas de ruedas, carritos de golf, bicicletas, patines, monopatines, movilidad personal, motos, motos de nieve y lanchas, por mencionar algunos ejemplos— y energizan al mismo tiempo vehículos eléctricos de diferentes modelos y dimensiones.

Si bien las BIL tienen un mercado maduro que inició desde la década de los 90, diferentes desarrollos tecnológicos han surgido de esta invención, destaca en particular la evolución acelerada de la electrónica portátil. Aunque el mercado actual de baterías de dispositivos móviles ha llegado a un punto de saturación, otros —como el del almacenamiento de energía portable y de red y dispositivos de mayor potencia— aumentan

igual que el de la electromovilidad. Por esta razón México realiza esfuerzos con grupos de especialistas en diferentes áreas de la cadena de valor de litio y de baterías para contribuir al desarrollo exitoso de estos dispositivos.

ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO Y SU IMPACTO SOCIOECONÓMICO

En la actualidad, las baterías de ion litio (BIL) son uno de los dispositivos de mayor relevancia para la transición energética de México y el mundo. Esto se debe a su demanda para implementar movilidad eléctrica en el transporte, para almacenar energía y usarse en dispositivos electrónicos. Es necesario adaptar y desarrollar esta tecnología para crear una industria nacional hacia la electromovilidad y atender, de esta manera, los sectores energético y de transporte con dos enfoques principales: *1*) contribuir a disminuir la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) generados por los sectores mencionados y *2*) mejorar la movilidad de la mayor cantidad de personas en el país —sobre todo la de mayor rezago— al habilitar el suministro de baterías para los vehículos de transporte público de pasajeros —autobuses, trolebuses, taxis, bicicletas y patines, entre otros. Entender los aspectos fundamentales de su funcionamiento y la importancia de la implementación de dicha tecnología en el sector transporte para la transición e independencia energética que el país requiere permitirá definir las acciones esenciales para su fabricación e implementación en corto y mediano plazo en sistemas estratégicos.

FUNDAMENTOS DE LAS BATERÍAS DE ION DE LITIO Y SU IMPORTANCIA PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

El gran atractivo de la tecnología del litio (Li) proviene del hecho de que es el metal más liviano, con un peso molar de 6.941 g mol^{-1}, densidad de

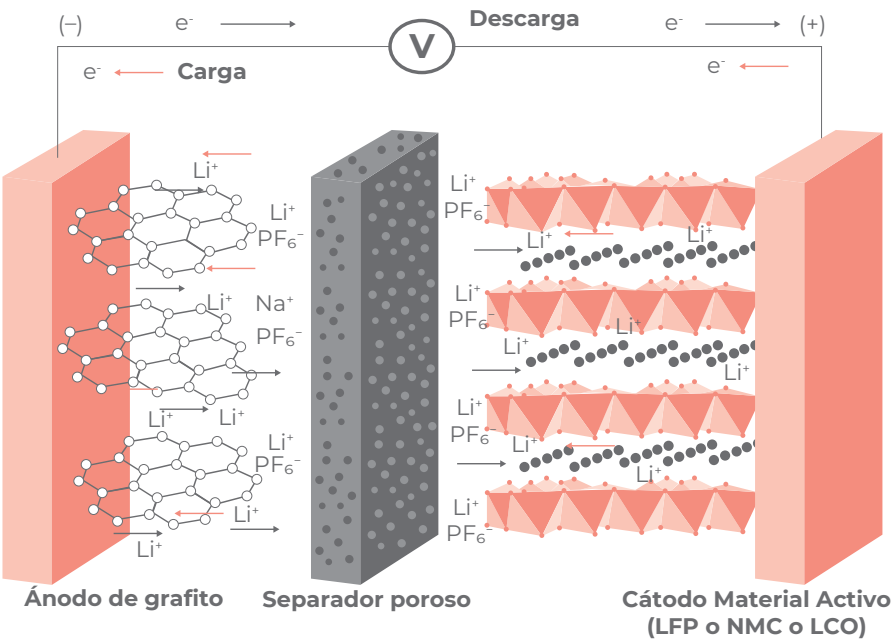
0.51 g cm^{-3} y configuración electrónica [He]$2s^1$. La capacidad específica del litio metálico es de 3860 $mAhg^{-1}$, y es el elemento de mayor afinidad electroquímica que se encuentra en la naturaleza; además, el par Li^+/Li^0 tiene la mayor electroactividad con potencial redox estándar de -3.04 V en comparación con el electrodo normal de hidrógeno (Julien et al., 2016).

Debido a sus propiedades fisicoquímicas, el litio y algunos compuestos de litio se utilizan para fabricar baterías, dispositivos capaces de almacenar energía química y convertirla en energía eléctrica que se puede liberar para energizar diferentes sistemas de interés. Comprender los fundamentos de su funcionamiento es esencial para incursionar en esta tecnología y lograr desarrollos exitosos. En este sentido, la figura 2 muestra un diagrama de una batería —celda— que representa su funcionamiento, así como las cuatro partes principales que la conforman: ánodo, cátodo, separador y electrolito.

El esquema representa el desplazamiento de los iones de litio entre los electrodos durante el proceso de carga y descarga, debido al potencial redox (Abraham, 2020). Este potencial es una medida de la tendencia de una especie química a ganar o perder electrones en una reacción redox. En una batería, el potencial redox se refiere a la diferencia de potencial eléctrico entre los dos electrodos de la batería. En otras palabras, durante la carga los iones de litio Li+ se separan del material catódico —desintercalación— y se dirigen hacia el ánodo a través del electrolito conductor; el separador permite el paso selectivo de iones, y al llegar éstos al ánodo se intercalan en él.

Al mismo tiempo que ocurre el transporte de Li+ y la intercalación, los electrones liberados en el cátodo fluyen a través de un circuito externo hasta llegar al material anódico donde se completa y equilibra la reacción. La tendencia de encontrar el equilibrio termodinámico genera una diferencia de potencial que promueve la liberación de iones y electrones, los cuales regresan por el mismo camino para incorporarse en el material catódico. El flujo de electrones por el circuito externo es la fuente de energía de los diferentes dispositivos mencionados.

Figura 2. Esquema del arreglo y funcionamiento de una batería de iones litio



Fuente: adaptado de Abraham (2020).

Las baterías como sistemas de almacenamiento de energía son esenciales para la electromovilidad, dado que poseen atributos favorables. Uno de ellos es la densidad energética, la cual indica la cantidad de energía que se puede almacenar en un volumen determinado. La tasa de autodescarga se refiere a la pérdida de energía cuando la batería no se usa. La eficiencia energética expresa la relación entre la energía que se puede extraer de la batería y la energía que se necesita para cargarla. Por último, el ciclo de vida determina el número de veces que se puede cargar y descargar la batería sin perder capacidad.

Las baterías de litio actuales están optimizadas y funcionan durante meses o años, y se espera que algunas lo hagan durante décadas. Se trata

de un logro considerable, dado que muchos de los materiales funcionan fuera de sus ventanas de estabilidad termodinámica.

A medida que se multiplica el uso de las BIL, también lo hacen los requisitos específicos, con una divergencia cada vez mayor de diseños y tamaños de baterías para adaptarse a cada uso. Un reto apremiante para México –en especial para la próxima década– es desarrollar baterías que contribuyan de forma significativa a reducir las emisiones de carbono para mitigar el calentamiento global. Diseñar, fabricar e implementar BIL son actividades que en definitiva puedan crear beneficios sociales, pero el diseño específico, la importación, fabricación y los gastos de transporte hacen que las baterías aumenten su precio.

Las BIL actuales, aunque importadas, son adecuadas para su implementación en electromovilidad, almacenamiento estacionario y aplicaciones en microrredes; no obstante, su costo impide su generalización en la red. Más aún, las dificultades relacionadas con los recursos minerales –exploración y extracción de compuestos estratégicos– retrasan por el momento el desarrollo y la fabricación de BIL con proveeduría mexicana.

PROSPECTIVA DE LA TECNOLOGÍA DE BATERÍAS DE ION DE LITIO

La disrupción de nuevas tecnologías de almacenamiento similares e incluso mejores a las BIL es un factor que de manera eventual afectará su crecimiento en el mercado. Las razones más importantes para esto van más allá de la disponibilidad de litio, ya que recaen en la habilidad de las nuevas tecnologías para sobrepasar las características de las BIL actuales. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías emergentes diferentes a las BIL (figura 3) están en desarrollo y aún deben demostrar que alcanzan características similares a las de las BIL, como densidad de energía, durabilidad, capacidad de almacenamiento a gran escala y eficiencia competitiva.

La figura 3 muestra las tecnologías inferiores y superiores a las BIL; se observa una reducción considerable de la energía específica de la

teoría a la práctica, sin embargo, las energías específicas prácticas estimadas son significativamente superiores a las de las tecnologías de baterías alternativas.

Es importante señalar que, por ejemplo, la mayor mejora de la batería de Li-aire respecto a la de Li-ion se observa en sus energías específicas con una diferencia de 400 Wh/kg, mientras que las densidades energéticas –volumétricas– pueden ser similares o sólo superiores de forma marginal. A pesar de que no se presentan en la gráfica de la figura 3, las baterías de Na, Mg, Ca e incluso las de estado sólido poseen una energía específica que se encuentra dentro del rango de los 265 hasta los 400 Wh/Kg, por lo que superan a la de las BIL.

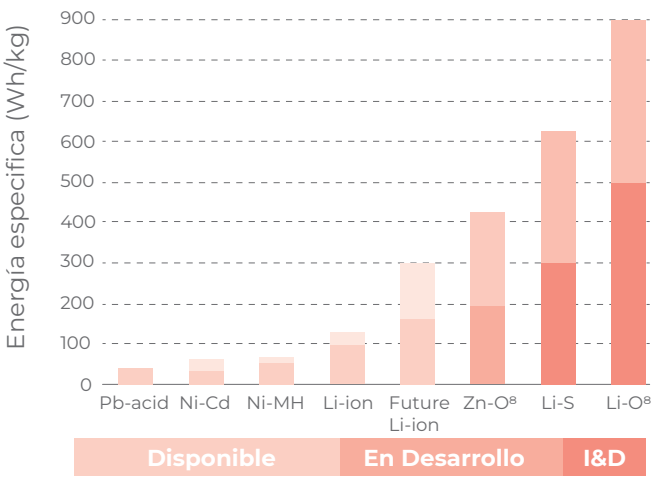
Igualmente debemos enfatizar que todas estas tecnologías podrían ser competitivas pero, actualmente –y por lo menos durante los próximos diez años–, no existe ninguna que compita directamente con las BIL. Por otro lado, también se reconoce que las tecnologías ahora prometedoras podrían avanzar con rapidez a las etapas de producción y comercialización masiva, como resultado de la inversión y avances tecnológicos (Suryatna et al., 2022).

Con relación a sus componentes, todas las BIL tienen como elemento común el litio, sin embargo, debido a la combinación de materiales catódicos, el núcleo de la batería está en constante cambio. Los cátodos de óxido de litio y cobalto (LCO) –que tienen un contenido de cobalto del 60% y están instalados en la mayoría de los teléfonos inteligentes y computadoras portátiles– están siendo desplazados del mercado a favor de los cátodos de óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC) de mayor densidad energética. Los cátodos NMC tienen un 20% menos de cobalto y se utilizan para energizar vehículos eléctricos con autonomías significativas y alto rendimiento. La prospectiva de los materiales de BIL (figura 4) muestra un notable cambio de cátodos ricos en cobalto a cátodos ricos en níquel.

De manera general, un mayor contenido de cobalto indica una batería más cara, y un mayor contenido de níquel equivale a una mayor densidad energética. Por otro lado, el fosfato de litio y hierro (LFP) y el óxido de litio

y manganeso (LMO) disminuyeron su presencia en el mercado debido a su baja densidad energética. Sin embargo, el LFP, sigue vigente gracias a su seguridad inherente, su bajo costo y su independencia de la cadena de suministro de cobalto y níquel (Buechel et al., 2021).

Figura 3. Comparación de la densidad energética de diferentes tipos de baterías



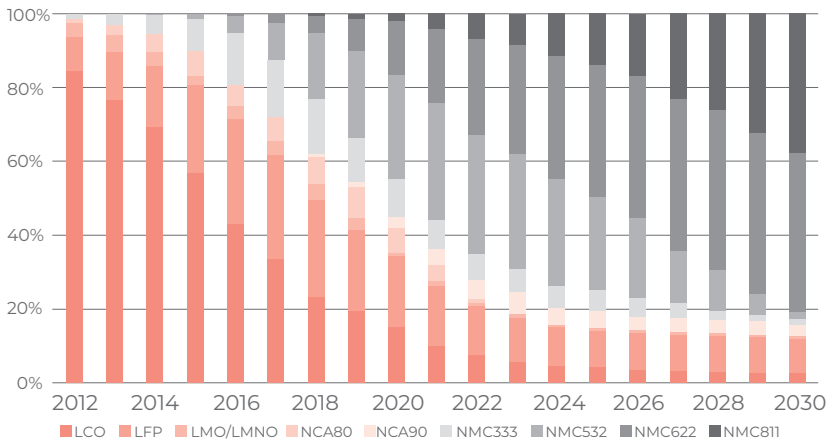
Fuente: adaptado de Suryatna y colaboradores (2022).

Existen diferentes ejercicios de prospección, como el mapa de ruta de la Unión Europea (Amici et al., 2022) mostrado en la figura 5. Éste supone una perspectiva de las baterías actuales, además de situar los retos en el horizonte medio (2030). La iniciativa europea de investigación a gran escala y a largo plazo con la visión de innovar en baterías sostenibles del futuro es conocida como *Battery 2030+*, y su objetivo es consolidar una sociedad climáticamente neutra.

El mapa de ruta presenta tres temas de investigación generales y seis áreas de investigación necesarias para crear un esquema genérico capaz de transformar la forma en que se podrían desarrollar y diseñar baterías.

Los temas y áreas son: *1*) descubrimiento acelerado de interfaces y materiales de baterías –genoma de interfaz de la batería (BIG) y plataforma de aceleración de materiales (MAP), por sus siglas en inglés–, *2*) integración de funcionalidades inteligentes –diagnóstico, autocuración– y *3*) áreas transversales –capacidad de fabricación y reciclabilidad– (Battery 2030, 2023).

Figura 4. Participación en el mercado actual y futuro de los diferentes cátodos para baterías de ion de litio

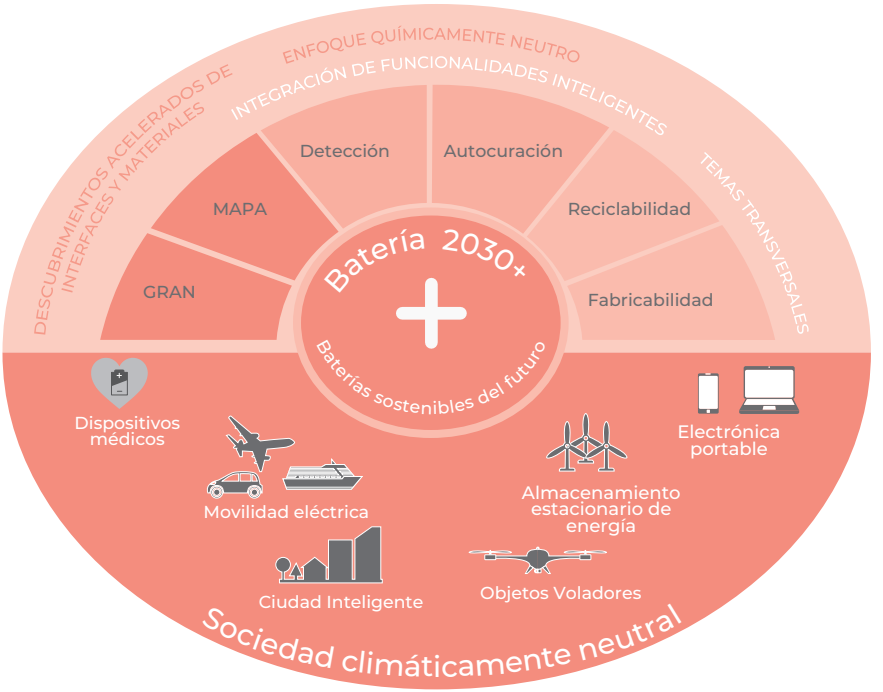


Fuente: adaptado de Buechel y colaboradores (2021).

También se presenta un panorama de las BIL en las generaciones tres –avanzadas–, cuatro –estado sólido y litio metálico– y cinco -litio-aire y litio-azufre–, así como baterías post-litio: iones de sodio, iones multivalentes, metal-aire y flujo redox, entre otras. El mismo documento sugiere que se deben considerar el apartado de generación de nuevos materiales y otros aspectos integrales, como herramientas de diagnóstico, reciclabilidad y nuevos métodos de manufactura. Entre éstos, el diagnóstico o censado es de particular interés, ya que las baterías requieren de métodos más avanzados para determinar el estado de carga y su condición para

el desempeño –número de ciclos de carga disponibles– de las mismas (Amici et al., 2022).

Figura 5. Mapa de ruta creado por la Unión Europea y proyección de las características de los dispositivos de almacenamiento de energía hasta 2030



Fuente: adaptado de Amici y colaboradores (2022).

Por su parte, el gobierno de los EE. UU., a través de Consorcio Federal para Baterías Avanzadas, presentó en un documento su plan nacional de BIL para orientar las inversiones en la cadena de valor nacional en torno a su fabricación, con el que esperan generar empleos de manufactura de energía limpia en la próxima década. Entre los objetivos de dicho plan destacan: garantizar el acceso a las materias primas –minerales de litio–, crear bases de procesamiento para fabricar baterías, reutilizar y el

reciclar materiales críticos al final de su vida útil e impulsar la tecnología de BIL, mediante el apoyo a la investigación, la educación asociada y el desarrollo de personal especializado en el área de BIL (Granholm, 2021).

OPORTUNIDADES DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE BATERÍAS DE ION DE LITIO

Existen diferentes sectores donde se puede aplicar la tecnología de BIL. No obstante, una prioridad en las oportunidades de aplicación es el sector transporte, ya que genera la mayor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que impactan negativamente en el ambiente. Con la finalidad de reducir la cantidad de emisiones, la implementación de BIL en electromovilidad es una de las estrategias más prometedoras para enfrentar el cambio climático. Otra oportunidad es el sector estacionario, que tiene aplicaciones sobre todo en servicios públicos, edificios comerciales y, eventualmente, en casas habitacionales. Por último, la tecnología BIL también puede implementarse en aplicaciones de micro-movilidad y sistemas de esparcimiento. A continuación, se presentan algunas de las oportunidades de mayor impacto de cada sector.

En el sector transporte

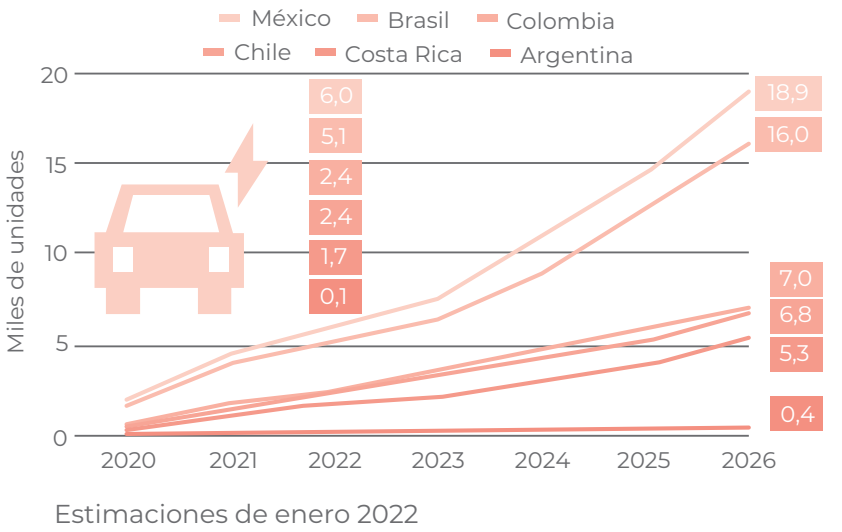
Vehículos eléctricos particulares

Debido a su sólida industria automotriz, de acuerdo con la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA), México ocupa el lugar número siete en producción de vehículos y dispone de diferentes centros de fabricación distribuidos en todo el país, por lo tanto, posee infraestructura suficiente para la transición hacia la producción masiva de vehículos eléctricos. De esta forma, se posicionaría como el mercado más grande en América Latina y podría obtener ingresos sustanciales que beneficiarían la economía local, como se muestra en la prospección de la figura 6

(Pasquali, 2022). El uso de vehículos eléctricos podría disminuir las emisiones, sobre todo en zonas urbanas, donde la mejora en la calidad del aire se traduce en la mejora de la salud de su ciudadanía (Energy5, 2024).

La optimización del rendimiento de los vehículos eléctricos, su menor consumo de energía y el menor impacto en la salud equivalen a ahorros de energía, ahorros económicos para las personas usuarias, menor gasto en salud para autoridades y mayor bienestar en general.

Figura 6. Prospectiva de la venta de vehículos eléctricos en América Latina desde 2020 hasta 2026



Fuente: adaptado de Pasquali (2022).

Transporte público

El transporte público sigue siendo la principal fuente de traslado en México y pese a requerir mayores capacidades de las BIL los autobuses, microbuses, combis, etc., son aptos para una conversión a tracción

eléctrica. Este modelo de negocio es una gran oportunidad, si se contempla que más del 70% de la población en México se traslada en autobuses de tamaños menores a 10 m (Suárez, 2017), por lo que para contrarrestar esta demanda se ha logrado tener un parque vehicular bastante amplio. En este sentido para México es esencial que en su agenda de Estado se priorice la electrificación del parque vehicular de transporte público por sobre la de vehículos de uso privado para beneficiar al mayor porcentaje de la población más vulnerable.

Si bien, aunque no son de origen nacional, diversas compañías de autobuses eléctricos han participado y ganado licitaciones gubernamentales que les han permitido introducir flotas de camiones eléctricos en diferentes ciudades de México, gracias a lo cual han contribuido a la movilidad sustentable. En este sentido, no hay duda de que México pueda aprovechar este modelo de negocio una vez que en se fabriquen BIL nacionales.

El sector privado bajo una agenda favorable a la Nación juega un papel fundamental en la fabricación de BIL. Se han identificado empresas nacionales con capacidad de producción industrial en cuanto a ensamblaje de módulos de baterías y vehículos eléctricos. La participación de la industria privada en las actividades relacionadas a la cadena de valor es medular para mantener una economía fortalecida y encaminada hacia la independencia tecnológica. Lo anterior crea nuevas cadenas productivas en las que se espera aumentar de manera progresiva en contenido nacional.

Transporte última milla y entregas a domicilio

La última milla es el último tramo del proceso de entrega de un pedido al cliente final. Según el sitio web Indicador Automotriz (2023) el crecimiento de este sector será del 78% a nivel global para 2030, bajo el supuesto de un incremento del 36% más de vehículos de entrega

en las 100 ciudades más importantes del mundo. Aunque este mercado es naciente en México el comercio electrónico o *e-commerce* va en aumento. Más allá de las empresas tradicionales de mensajería y paquetería, su potencial es atractivo y se está modernizando para cumplir con las promesas de entregas en uno o dos días. En esta logística se identifican oportunidades para transformar el transporte a gasolina por tracción eléctrica, con los consecuentes menores costos operativos, y para que dichas entregas se realicen con el menor impacto en emisiones.

Transporte de carga

Para este segmento del mercado de transporte pesado aún se requiere encontrar modelos de negocio atractivos, ya que las distancias requeridas suelen ser muy grandes: 500 km o incluso más de 1000 km. Bajo estas condiciones, los camiones requieren sistemas de baterías grandes para poder transportar cargas mayores en largas distancias, lo que incrementa el costo de inversión y el peso del camión, y, aun consiguiendo un precio razonable, existe el reto de cargar una batería de semejantes dimensiones en tiempos razonables. A pesar de que hasta ahora las autonomías para este tipo de vehículos son de alrededor de 250 km, algunos fabricantes internacionales han logrado introducir camiones de carga 100 % eléctricos al mercado mexicano (Munguía, 2020; Cervantes, 2022; Scania-México, 2022).

Electrificación de transporte ligero

Las conversiones de vehículos de combustión interna a tracción eléctrica son un modelo de negocio que algunas empresas mexicanas están explorando. Esta metodología consiste en remover el motor convencional y sustituirlo por uno eléctrico. El sistema, junto con la electrónica de potencia necesaria, es energizado por un paquete de BIL que se incorpora al

vehículo usado. Actualmente, en este modelo se prefiere el uso de baterías de LFP tipo prismáticas o cilíndricas por sus características de estabilidad y seguridad. Las motivaciones para la electrificación se basan en las eficiencias energéticas del 80% o incluso mayores de los vehículos eléctricos, comparados con el 30% de la mayoría de los convencionales; esta diferencia se debe a que en los motores eléctricos los efectos de intercambios termodinámicos por combustión se eliminan, lo que ahorra recursos energéticos.

Transporte individual

La movilidad eléctrica individual se refiere a los medios de transporte eléctricos que son utilizados por una sola persona. En este sector hay muchas oportunidades, ya que la cultura de electromovilidad a nivel individual ha adquirido relevancia en las grandes urbes. Este mercado es bastante amplio, pues se trata de dispositivos que, si bien al inicio tienen un costo relativamente elevado, se consideran accesibles. En este servicio se considera la implementación y optimización de BIL para bicicletas, motocicletas –2, 3 o 4 llantas– mini vehículos para vecindario, carritos de golf, patines, monopatines —*segways*—, patinetas, sillas de ruedas, carritos de supermercado para personas con discapacidad, etc.

En el almacenamiento estacionario

Las energías renovables, como la solar y eólica, son intermitentes, pero pueden administrarse mejor si se almacenan para usarse de forma posterior con mayor control. Hoy en día existen numerosos sistemas de almacenamiento que aprovechan la tecnología BIL para optimizar la producción de electricidad con estas fuentes renovables y administrar el despacho de dicha energía sustentable. El manejo de energía renovable, a través de sistemas de almacenamiento de energía usando BIL, proporciona una mayor viabilidad técnica y económica.

Aplicaciones principales

Si se cuenta con la tecnología BIL de primera mano, los sistemas de almacenamiento pueden implementarse en inversores de potencia utilizados en vehículos eléctricos, almacenamiento de energía para edificios comerciales y uso residencial, demandas industriales, servicios a la red eléctrica, subestaciones, líneas de trasmisión y estaciones energéticas. En suma, son ideales para la estabilización de la red, ya que pueden compensar de inmediato las fluctuaciones de frecuencia de la red eléctrica.

En los hogares, comercios y las empresas, un sistema de almacenamiento en baterías puede almacenar de manera temporal la energía solar autogenerada durante el día para consumirla más tarde por la noche. En un contexto industrial, también resulta atractivo utilizar la propia electricidad de los sistemas de almacenamiento en baterías para conseguir tarifas de red más bajas. En casos más especiales podrían proporcionar servicios de infraestructura, como un restablecimiento del suministro eléctrico en caso de fallo grave de la red.

Servicios a la red eléctrica nacional

Para lograr un mejor despacho de energía de fuentes renovables, es necesario entender cómo los sistemas de almacenamiento de energía estacionaria pueden proporcionar servicios a la red eléctrica de diversa índole que, en su conjunto, abonan a la funcionalidad del Sistema Eléctrico Nacional. Por mencionar algunos ejemplos, pueden proporcionar capacidad adicional, aplicaciones de generación distribuida, planeación de inversiones, control de picos de demanda y regulación de voltaje, entre otros. Del mismo modo, comunidades en zonas con difícil acceso a la red eléctrica –lugares remotos, islas y penínsulas– pueden beneficiarse de emplear estas tecnologías. Los aportes más importantes se encuentran a nivel de distribución, donde se tienen los mayores retos para establecer un equilibrio entre capacidad de generación y demanda.

En aplicaciones especiales

Este mercado está dominado por dispositivos de entretenimiento o aplicaciones especiales. Por ejemplo, drones para esparcimiento, entrega de paquetes pequeños en edificios, eventos inaugurales y culturales –se evita la pirotecnia–, vigilancia y seguimiento policial, entre otros. Además, las BIL se pueden utilizar para el energizado de herramientas, juguetes, electrónicos, motos acuáticas, motos de nieve, robots de reconocimiento, accesorios de cuidado personal, satélites, dispositivos y equipos de estudios médicos.

En este último caso, las BIL se emplean en varios dispositivos en el campo de la atención médica, como marcapasos, termómetros, herramientas quirúrgicas, desfibriladores, medidores, oxímetros, robots médicos, bombas de infusión, monitores, dispositivos anticonceptivos, sensores de control de vida, computadoras portátiles, ventiladores, mesas de operaciones y sierras quirúrgicas. Estos dispositivos tienen un papel vital en el cuidado de la salud y requieren una fuente de energía portátil confiable para garantizar que estén siempre disponibles.

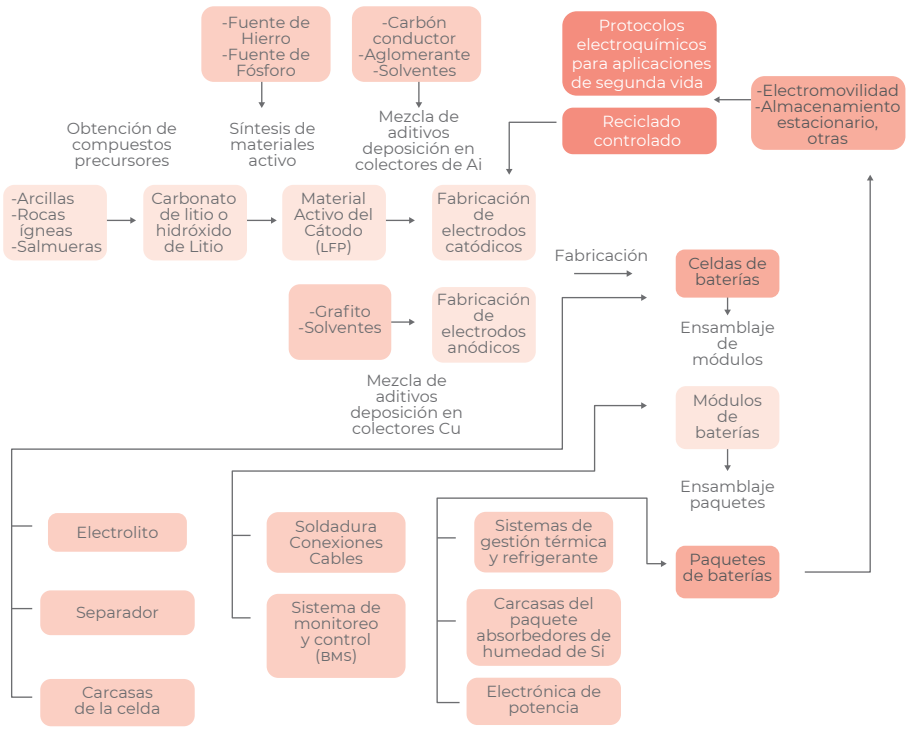
CADENA DE VALOR DE LAS BATERÍAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL LITIO Y MINERALES ASOCIADOS

La cadena de valor de las baterías de ion de litio (BIL) consta de cuatro etapas (figura 7): *1*) síntesis de materiales activos, *2*) fabricación de electrodos, *3*) fabricación de celdas y *4*) ensamble de módulos y paquetes, sin embargo, un quinto eslabón podría estar asociado a una economía circular que involucre el reciclado y aplicaciones de segunda vida. Con base en la presencia de yacimientos de litio en el territorio nacional se identifica que los compuestos imprescindibles y principales precursores para detonar la fabricación de BIL son el carbonato de litio (Li_2CO_3) o el hidróxido de litio (LiOH). Además, dado que el enfoque mexicano es desarrollar BIL con el

mayor porcentaje de proveeduría nacional, es necesario considerar una serie de aditivos y componentes críticos para la fabricación de BIL en México.

En este sentido, debido a su seguridad inherente, su bajo costo y su independencia de la cadena de suministro de cobalto y níquel, la química de fosfato de litio y hierro (LFP) (Jones et al., 2021) es considerada la más apta para los fines de la agenda de Estado. El LFP fue seleccionado por su buena adaptabilidad a sistemas estacionarios, vehículos eléctricos, cuestiones de costos y mayor demanda.

Figura 7. Cadena de valor para la fabricación de baterías de fosfato de litio y hierro (LFP)



Fuente: elaboración propia basado en Jones y colaboradores (2021).

Por lo tanto, parte de la cadena de valor de las BIL es poder determinar la mejor ruta para la síntesis de LFP a partir de los compuestos de litio provenientes de la etapa extractiva. Una vez abordados los temas de precursores, materiales activos y ciclos de fabricación, se plantean procedimientos de escalamiento a nivel de planta piloto para articular todas las etapas y lograr la obtención de prototipos nacionales. Para promover la economía circular, se plantea la elaboración de protocolos para generar conocimiento asociado a la reutilización y reciclaje de BIL importadas implementadas en electromovilidad o almacenamiento estacionario. Este conocimiento será fundamental para tratar a mediano y largo plazo las baterías que se comenzarán a acumular al terminar su vida útil.

COMPUESTOS DE LITIO IMPRESCINDIBLES PARA DETONAR LA FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE ION DE LITIO

Acorde con el capítulo 3, el segundo eslabón de la cadena de valor de litio propiciará la extracción de carbonato e hidróxido de litio, las fórmulas químicas de estas sales inorgánicas son Li_2CO_3 y LiOH, respectivamente, y se trata de los principales insumos en la producción de BIL.

Después de su obtención, para que el Li_2CO_3 y LiOH se puedan utilizar en la fabricación de baterías, deben pasar por una serie de procesos donde se combinan con diferentes compuestos conocidos como "precursores". La combinación de las sales de litio con los diferentes precursores permite la obtención del "material activo" (MA). En términos de aplicación, las baterías de materiales activos de compuestos ternarios como níquel, cobalto y aluminio (NCA) —de alto contenido en níquel—, así como las BIL de níquel, manganeso y cobalto (NMC) suelen utilizar LiOH. Estas baterías poseen una mayor densidad de energía, y se utilizan en múltiples sectores, incluida la industria automotriz.

El Li_2CO_3 suele usarse como precursor químico para fabricar BIL de LFP; las baterías poseen menor densidad de energía y baja resistencia,

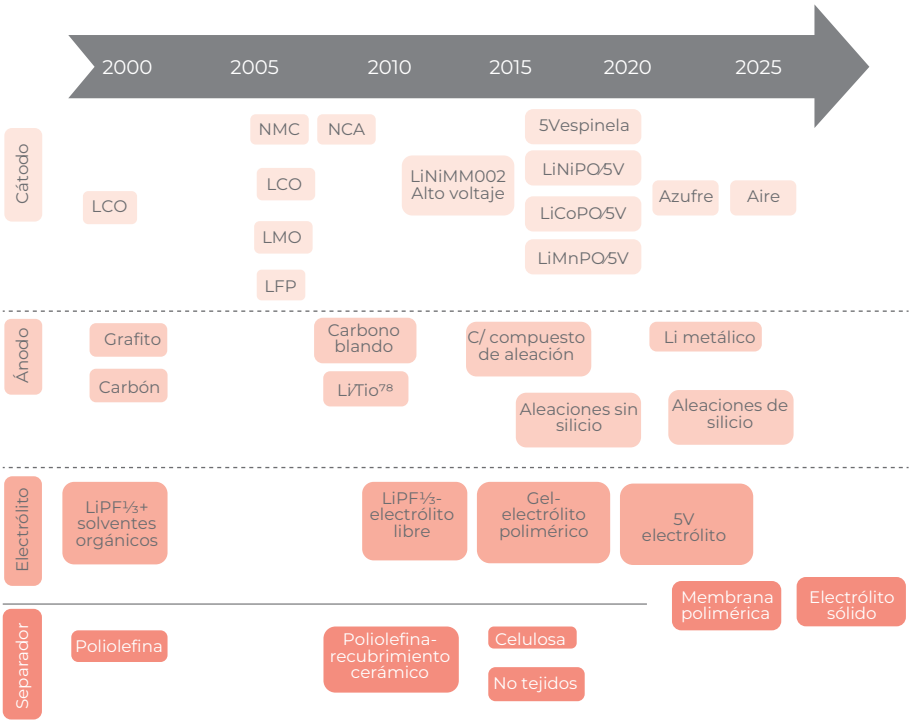
pero ofrecen mayor seguridad y estabilidad térmica, garantizan una gran durabilidad y un largo ciclo de vida. Así, las BIL de LFP son usadas con mayor frecuencia en motos eléctricas, electrónica portátil y recientemente, en la fabricación de paquetes para su aplicación a electromovilidad. Los productores de baterías de óxidos de litio y NCA, como Panasonic (BIL 18650), Tesla y LG Chem, llevan mucho tiempo empleando LiOH como fuente de litio, y se ha descubierto que esto es incluso preferible para la fabricación de electrodos NMC811 ricos en Ni.

Sin embargo, el LiOH es más corrosivo y su punto de fusión es de sólo 471 °C comparado con los 720 °C del Li_2CO_3, el cual posee menos fluctuaciones en su grado de pureza. Por estos motivos, muchos fabricantes optan por utilizar Li_2CO_3 en lugar del LiOH en la síntesis de materiales activos para la producción de materiales de cátodo de NMC y LFP (Yu, 2020; Large, 2023; Poworks-Lithium, 2023).

MATERIALES ACTIVOS COMO COMPONENTES CRÍTICOS PARA LA FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE ION DE LITIO

Las BIL han tenido una evolución notoria en diversos aspectos, y diferentes grupos nacionales e internacionales dedican esfuerzos para la investigación y el desarrollo de sus componentes. Los esfuerzos se centran en la mejora y optimización de la composición química, aditivos, electrolitos, componentes internos, aspectos geométricos para su adaptación a diferentes sistemas, componentes externos a la batería para su correcta implementación, configuración, diseño de electrónica de potencia y *software* para la administración energética. Así, debido al carácter imprescindible de todos los componentes de las BIL, conocerlos, estudiarlos y entender su funcionamiento permite proponer mejoras para su optimización. La figura 8 muestra la química de los cuatro elementos fundamentales para el funcionamiento de una BIL y su evolución en el tiempo (Chabot, 2016).

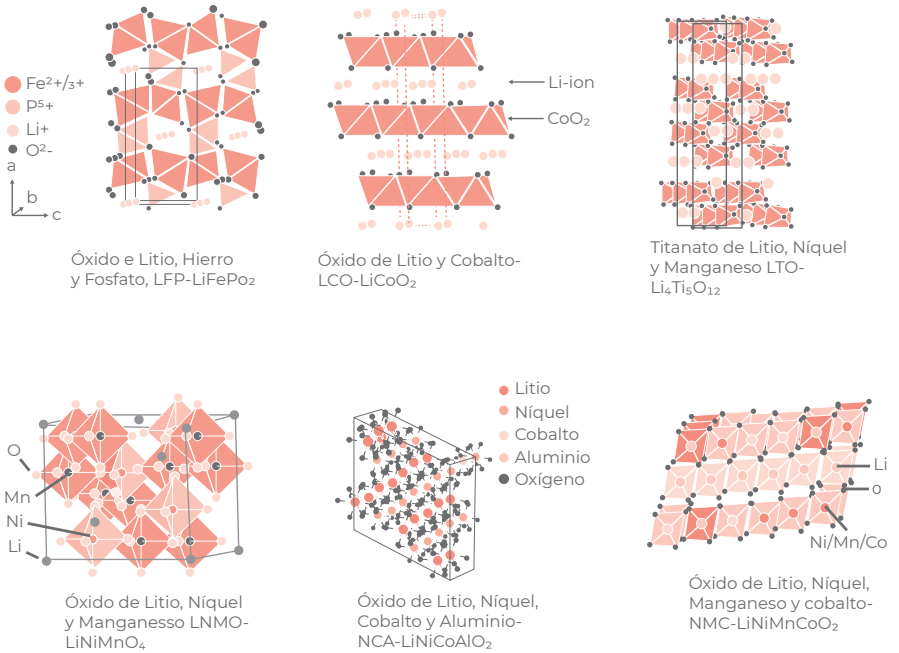
Figura 8. Evolución de los componentes de las baterías de ion de litio



Fuente: adaptado de Chabot (2016).

Uno de los componentes que resulta decisivo para el desempeño de la batería y que ha tenido una evolución dinámica, es el cátodo y su composición química, la cual es referida en la jerga del área como "química del litio". Para mejorar el rendimiento, la seguridad y la rentabilidad de la batería, es importante elegir el material de cátodo correcto, ya que el electrodo catódico es crucial en la determinación del voltaje de los sistemas de BIL. Algunas de las estructuras cristalinas de las químicas más utilizadas en la fabricación de BIL a nivel comercial se presentan en la figura 9 (Kamalika Ghatak et al., 2017; Fiorentini et al., 2019; Pachuta et al., 2019; Sohu, 2020; Zhu et al., 2021).

Figura 9. Estructura cristalina de las principales químicas utilizadas en la fabricación de baterías de ion de litio



Óxido e Litio, Hierro y Fosfato, LFP-$LiFePo_2$

Óxido de Litio y Cobalto-LCO-$LiCoO_2$

Titanato de Litio, Níquel y Manganeso LTO-$Li_4Ti_5O_{12}$

Óxido de Litio, Níquel y Manganesso LNMO-$LiNiMnO_4$

Óxido de Litio, Níquel, Cobalto y Aluminio-NCA-$LiNiCoAlO_2$

Óxido de Litio, Níquel, Manganeso y cobalto-NMC-$LiNiMnCoO_2$

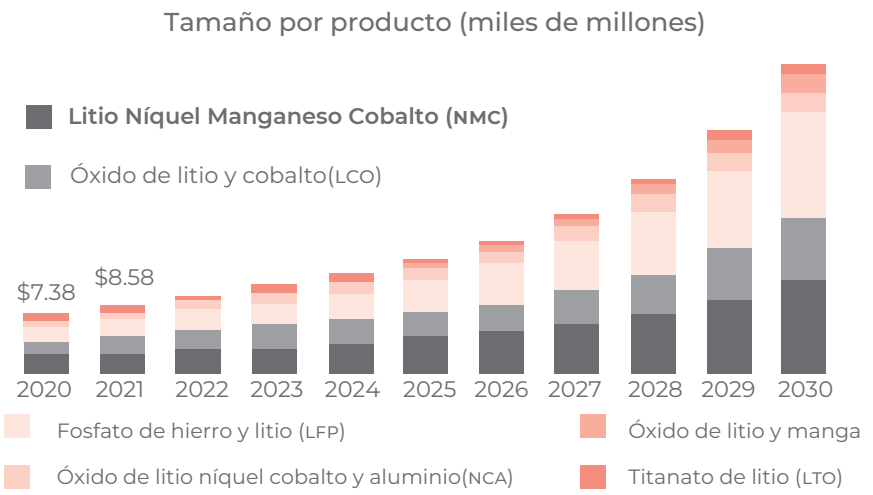
Fuente: adaptado de Ghatak y colaboradores (2017), Fiorentini y colaboradores (2019), Pachuta y colaboradores (2019), Sohu (2020), así como Zhu y colaboradores (2021).

En la fabricación de BIL a nivel comercial, el LCO suele ser empleado en vehículos eléctricos, el NMC en teléfonos inteligentes, el NCA en sistemas de almacenamiento de energía y el LFP en herramientas eléctricas. Los NMC pueden reducir al mínimo el consumo de cobalto manteniendo un alto rendimiento y seguridad, lo que los convierte en el material ideal para baterías de gran tamaño —es decir, para uso en vehículos—. Las LFP generan una gran potencia y densidad de carga, al tiempo que conservan la excepcional seguridad y prolongada vida útil del material catódico.

Los materiales catódicos activos presentados poseen su propio conjunto de ventajas, entre las que se incluyen las siguientes: el LCO posee

una alta energía específica; el LMO se caracteriza por presentar una alta potencia específica; el NCA y NMC permiten la fabricación de las BIL más económicas y con una estabilidad térmica aceptable; el LFP presenta una baja capacidad y una alta tasa de autodescarga, pero una curva de potencial a circuito abierto (*open circuit voltaje* OCV) plana, una mayor estabilidad térmica y por lo tanto una mayor seguridad; y el LTO suele tener una larga vida útil y una carga rápida (Abu et al., 2023).

Figura 10. Principales químicas utilizadas en baterías de ion de litio y su proyección de crecimiento para 2030 en los Estados Unidos



Fuente: adaptado de Grandviewresearch (2021).

Algunas de las químicas mencionadas tienen composiciones más sencillas que han ido en desuso por enfrentar desventajas tecnológicas y económicas evidentes, como en el caso de las químicas LCO y LMO. Los desarrollos actuales consideran químicas avanzadas con base en las estructuras de los minerales perovskita —olivina— y espinelas. Dentro de las químicas más competitivas en el presente están las NCA y las NMC,

incluso para aplicaciones de electromovilidad. Más aún, el NMC es considerado el mejor material para su uso como cátodo en las BIL debido a que logra una mayor velocidad de difusión del litio en su estructura y una mejorada movilidad de electrones; estas propiedades le confieren mayor potencia y densidad energética, y le permiten posicionarse arriba de las baterías convencionales.

Aunque se espera que el LCO siga estando presente en las BIL (figura 10), se proyecta que el LFP y los NMC sigan ganando popularidad de manera continua para 2030, hasta volverse predominantes tanto en vehículos eléctricos como en los dispositivos comerciales de electrónica portátil. Por otra parte, con relación al ánodo, se espera que el grafito continúe dominando, no obstante, en la literatura se han presentado avances en el desarrollo de materiales para ánodos basados en aleaciones metálicas, modificaciones de grafeno, silicio y óxidos de metales de transición (Grandviewresearch, 2021; Abu et al., 2023).

EL FOSFATO DE LITIO Y HIERRO COMO COMPUESTO PRIORITARIO PARA LA SOBERANÍA TECNOLÓGICA DE MÉXICO EN MATERIA DE ELECTROMOVILIDAD

El fosfato de litio y hierro (LFP o $LiFePO_4$) es considerado uno de los candidatos más prometedores para la próxima generación de baterías avanzadas de iones de litio de alta energía. Este material es ideal para la fabricación de BIL en México, debido a que es considerado uno de los materiales catódicos con mayor potencial por su bajo coste como materia prima, su escasa toxicidad, su respeto por el medio ambiente, sus excelentes propiedades de seguridad, su rendimiento en el ciclado y su larga vida útil. El LFP es el material catódico más popular para baterías de iones de litio seguras y de alta potencia en módulos de gran formato, necesarios para vehículos eléctricos o híbridos.

Debido a su buena adaptabilidad tanto a vehículos eléctricos como a sistemas estacionarios y cuestiones de costos y mayor demanda, la

química LFP es la más utilizada para fabricación de BIL. Sin embargo, el LFP tiene el inconveniente de poseer una baja conductividad iónica y electrónica intrínseca que induce un rendimiento deficiente a altas velocidades, por lo que sus deficiencias cinéticas siguen siendo el principal obstáculo para su aplicación. Por fortuna, existen diferentes estrategias para contrarrestar estas deficiencias en la etapa de síntesis. Por lo general, durante dicha etapa el LFP es recubierto con materiales conductores a fin de aumentar propiedades que le permitan alcanzar los valores de capacidad óptimos para un mejor rendimiento en las BIL (Suttison et al., 2022).

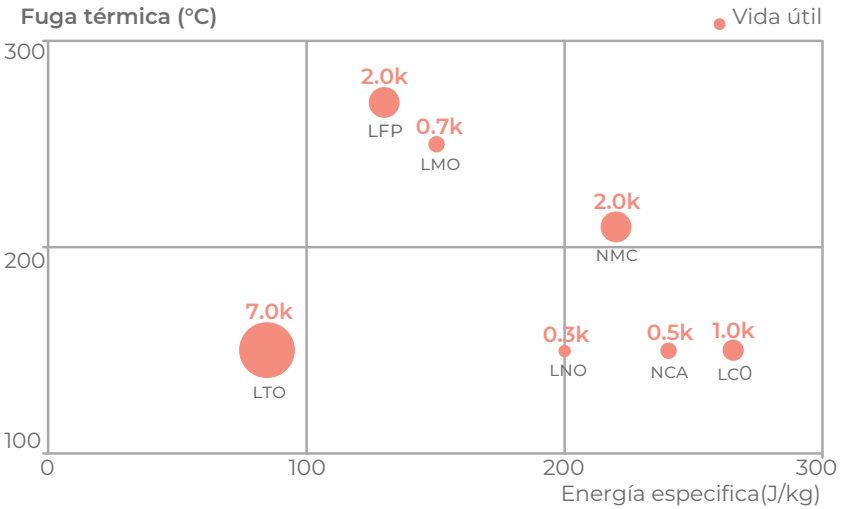
El mercado actual de BIL de LFP es bastante amplio, y se tienen a disposición diferentes configuraciones geométricas, como BIL cilíndricas, tipo bolsa –*pouch cell*– y prismáticas. Aunque el proceso de manufactura de las cilíndricas es más complejo, éstas representan un mayor grado de seguridad. Pese a ello, no se descarta que el tipo bolsa tenga mayor potencial porque sus etapas de fabricación e infraestructura son más accesibles. Así, por las características mencionadas y sobre todo por cuestiones de seguridad, desarrollar BIL de LFP es lo más factible para México en la actualidad.

Si bien el mercado consumidor muestra resistencia a la adopción de nuevas marcas por cuestiones históricas de seguridad –explosividad–, el LFP es el material con la mayor estabilidad térmica debido a que su punto de fuga térmica es cercano a los 280 °C como se muestra en la figura 11 (Abu et al., 2023).

La estabilidad térmica del LFP le provee un mayor grado de seguridad, por lo que las baterías fabricadas con LFP difícilmente se podrían incendiar o provocar su autoignición por su uso prolongado. Por esta razón, se puede garantizar la seguridad en la fabricación de BIL de LFP, y su manufactura no sólo viable resulta sino de suma importancia para su integración en vehículos eléctricos que impulsen la electromovilidad en el transporte público para beneficiar a la mayor cantidad de personas, con un impacto ambiental positivo y significativo para el país. Las BIL desarrolladas estarán embebidas directamente en el vehículo eléctrico,

y no se estarían extrayendo o intercambiando, por lo que el desempeño del vehículo reflejaría de manera indirecta la calidad de las BIL de LFP.

Figura 11. Temperatura de fuga térmica y energía específica de diferentes tipos de materiales catódicos para baterías de ion de litio



Fuente: adaptado de Abu y colaboradores (2023).

SÍNTESIS DE FOSFATO DE LITIO Y HIERRO PARA APLICACIÓN EN BATERÍAS

Gracias a las propiedades del LFP, la fabricación de BIL con esta química permitirá fortalecer la cadena de valor del litio para impulsar la electromovilidad en el transporte público en México. Para lograr este objetivo, una etapa crítica es la obtención del material activo LFP. En la literatura existen reportes (Liu et al., 2023), de diferentes métodos de síntesis para obtenerlo, en este sentido se debe considerar que el grado de pureza, la morfología, el tamaño de partícula y las propiedades conductoras son factores de suma importancia al predecir el rendimiento

del material para su aplicación en BIL. Para la síntesis de LFP son necesarios al menos tres de los siguientes precursores: la fuente de litio, la fuente de hierro y la fuente de fósforo. La tabla 1 muestra los principales precursores utilizados en la síntesis de LFP; en el caso de la estrategia mexicana sólo se considera el Li_2CO_3 o LiOH como fuente de litio.

Tabla 1. Precursores principales utilizados para la síntesis de fosfato de litio y hierro

PRECURSORES					
FUENTES DE LITIO		FUENTES DE HIERRO		FUENTES DE FÓSFORO	
LiF	Fluoruro de litio	$FeC_2O_4{\cdot}2H2O$	Oxalato de hierro dihidratado	$NH_4H_2PO_4$	Fosfato monoamónico
Li_2CO_3	Carbonato de litio	$Fe(CH_3COO_2)_2$	Acetato de hierro II	$(NH_4)_2HPO_4$	Fosfato di amónico
$LiOH{\cdot}2H_2O$	Hidróxido de litio di hidratado	$FePO_4(H_2O)_2$	Fosfato de hierro III	LiH_2PO_4	Dihidrógeno fosfato de litio
CH_3COOLi	Acetato de litio	$FeSO_4{\cdot}7H_2O$	Sulfato de hierro pentahidratado	H_3PO_4	Ácido fosfórico

Fuente: elaboración propia.

Tras establecer los precursores, es importante mencionar las diferentes rutas de síntesis. La siguiente lista muestra las más utilizadas, divididas en dos secciones: *1*) las que están basadas en reacciones de estado sólido y *2*) las que se llevan a cabo en solución:

Reacciones en estado sólido

1. Reacción de precursores en estado sólido.
2. Activación mecano-química.
3. Reducción carbo-térmica.
4. Procesamiento bajo microondas.

Química en solución

1. Procesamiento hidrotérmico.
2. Procesamiento sol-gel.
3. Método de coprecipitación.
4. Método de secado de emulsiones.
5. Método de aerosol-pirólisis.

La calidad del LFP está determinada por dos factores importantes:

a. La ruta de síntesis.
b. La fuente de litio.

Cada una de estas rutas tiene un proceso específico, una de las más flexibles es la reducción carbo-térmica. Esta ruta permite el uso directo de compuestos de hierro tres [Fe(III)] como precursores de Fe. En general, los compuestos de Fe (III) son relativamente baratos. La reducción carbo-térmica es una reacción de reducción a alta temperatura que utiliza una fuente de carbono como agente reductor. Cuando se utiliza para producir polvos de $LiFePO_4$, el método es excelente para la reducción de Fe (III), la estabilización de Fe (II), el control de la morfología de las partículas y el recubrimiento de $LiFePO_4$ con carbono residual. La reacción a nivel laboratorio se presenta a continuación (Liu et al., 2023):

$$FeSO_4 \cdot 7H_2O + H_3PO_4 + FePO_4 \cdot 2H_2O \xrightarrow[450\ °C]{\triangle} FePO_4$$

Relación de reactivos [($FePO_4$ + Li_2CO_3 (1:2)]

$$FeSO_4 + Li_2CO_3 + C_6H_{12}O_6 \xrightarrow[600\ °C]{\triangle} \xrightarrow[C]{LFP} \xrightarrow[12\ h]{110\ °C} LiFePO_4$$

En la ruta de síntesis presentada la fuente de litio puede variar, ya sea que se utilice el Li2CO3 o que se reemplace por $LiOH{\cdot}2H_2O$.

Consideraciones en la etapa de síntesis de fosfato de litio y hierro

Los métodos de síntesis de LFP deben superar los desafíos de conductividad iónica y electrónica, por lo que la selección del método de síntesis corresponde a una de las variables iniciales de suma importancia. A escala industrial, el LFP se produce por métodos de estado sólido debido a ventajas como la menor producción de residuos contaminantes y por su facilidad para obtener grandes toneladas del compuesto. Cabe resaltar que el método hidrotermal también es una ruta de síntesis de interés reportada para la producción industrial de LFP, ya que por este método se obtienen partículas de tamaño controlado con propiedades fisicoquímicas y energéticas que le permiten alcanzar las capacidades específicas deseadas (Jugović y Uskoković, 2009; Liu et al., 2023).

Las reacciones y síntesis químicas pueden realizarse a diferentes escalas, en función de la aplicación prevista del producto deseado. Al inicio, se suele operar a pequeña escala —de 10 a 100 miligramos—, por lo que se prioriza el aislamiento del producto por encima de cualquier otra consideración, para generar material suficiente para determinar con rapidez si algunos compuestos justifican una mayor investigación. Sin embargo, a medida que aumenta el interés por una serie concreta de compuestos, se requiere operar a una escala mucho mayor –de 10 a 100 gramos– para obtener material suficiente que permita realizar una gama más amplia de estudios detallados.

El escalamiento de una reacción química es un proceso complejo que va mucho más allá de la simple noción de ejecutar la misma reacción en cantidades y equipos mayores. Se debe prestar especial atención a varios factores clave, como: la elección de la ruta, los reactivos y los disolventes; las consideraciones de salud y seguridad; el aislamiento y la

purificación del producto deseado; y el desarrollo de una sólida metodología analítica de apoyo.

Por esta razón, la aplicación de las rutas de síntesis debe explorarse primero a nivel laboratorio para determinar los parámetros mencionados, así como las condiciones óptimas para su reproducibilidad, rendimiento, seguridad, parámetros de costo, así como rutas sintéticas versátiles y rápidas para el compuesto elegido (Hitchin, 2022). Para conseguirlo, se requerirá de un esfuerzo en colaboración con las instituciones de educación superior, así como con centros públicos, e incluso privados de investigación y el sector privado.

Debido a la gran variedad de las rutas sintéticas existentes, se recomienda utilizar los métodos de experiencia, infraestructura y equipos para realizarlas exitosamente. Esta información se presenta en la sección de fortalezas de México en investigación.

ETAPAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE ION LITIO

En la etapa de fabricación es importante considerar que el funcionamiento de la BIL depende de cuatro componentes esenciales, el cátodo, el ánodo, el separador y el electrolito. En la tabla 2 se muestran estos componentes y los diferentes compuestos y sustancias que se pueden utilizar. De la tabla es necesario considerar que el electrolito se prepara disolviendo la sal de litio ($LiPF_6$) en los solventes orgánicos que se encuentran en estado líquido. En el caso del material para cátodo, si bien se presentan alternativas, el énfasis es en LFP.

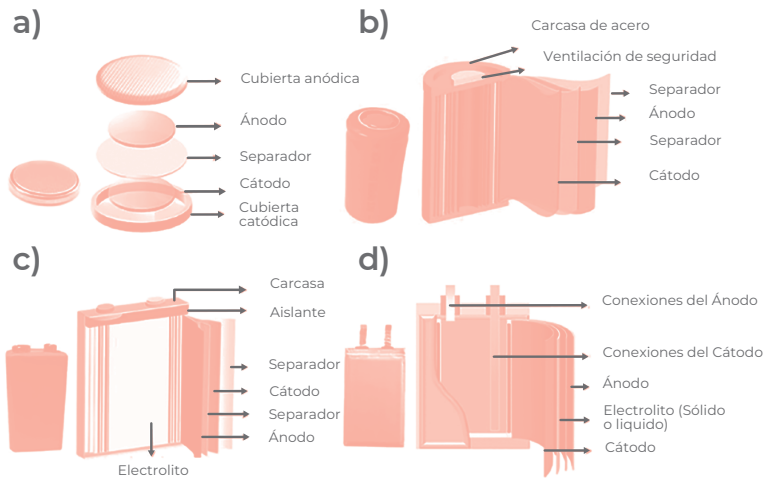
Las BIL suelen fabricarse en diversos tamaños y geometrías, pero las principales (figura 12) son tipo moneda, cilíndricas, prismáticas y tipo bolsa –*pouch cell*– (Liang et al., 2019). Aunque la fabricación de celdas es diferente en función de cada geometría, todas presentan tres etapas principales: *1*) preparación de los electrodos, *2*) ensamble de la celda y *3*) activación electroquímica.

Tabla 2. Partes y componentes de una batería de ion de litio

CÁTODO		ÁNODO	
Fosfato de litio y hierro	LFP	Grafito	C
Óxidos de litio, níquel, manganeso y cobalto	NMC (NCM111, NCM523, NCM622, y NCM811	Grafeno	C
		Silicio	Si
Óxidos de litio, níquel, cobalto y aluminio	NCA	Carbono activado	C
		Negro de carbón	C
ÓXIDO DE LITIO Y COBALTO	LCO	TITANATO DE LITIO	LI_2TIO_3

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Esquemas de una batería



Nota: *a*) Tipo moneda, *b*) Cilíndrica, *c*) Prismática, *d*) Bolsa.
Fuente: adaptado de Liang y colaboradores (2019).

SEPARADOR		ELECTROLITO	
Poliolefinas (Polímeros-Polipropileno)	(C_3H_6) n	Hexafluoro-fosfato de Litio	$LiPF_6$ (sal de litio)
		Solventes	
		N-Metil Pirrolidona	NMP
Poliolefinas con revestimiento de nano-alúmina o bohemita de alta pureza	Oxihidróxido de aluminio AlO (OH).	Etilen-Carbonato	EC
		Propilen-Carbonato	PC
		DIMETIL-CARBONATO	DMC

Etapa 1- Síntesis

Esta etapa está asociada a la síntesis del material activo MA a partir de los compuestos estratégicos, los detalles fueron abordados en la sección de Síntesis de fosfato de litio y hierro para aplicación en baterías

Etapa 2- Fabricación de electrodos

En esta etapa y para el caso de los electrodos del cátodo, el objetivo es obtener un material compuesto también conocido como *composite*, el cual se obtiene mezclando los diferentes aditivos: el material activo (MA); una fuente de carbono y un aglutinante cuyo objetivo es mantener la cohesión de las partículas del material activo y de los aditivos conductores; el aglutinante más utilizado es el polifluoruro de vinilideno (PVDF). Estos componentes se colocan en recipientes de mezcla donde se agrega N-Metil-2-pirrolidona como solvente. Una vez mezclados todos los aditivos se obtiene una especie de tinta también conocida como *slurry*, esta tinta es el material compuesto

que se coloca sobre una tira de aluminio cuya función es servir como colector de corriente; en esta etapa se debe asegurar la distribución homogénea de la tinta.

Factores como la relación de aditivos y el espesor de la capa formada son críticos para obtener electrodos funcionales. Para el ánodo, se realiza un proceso similar, pero en este caso se utilizan sólo el grafito, el aglutinante y el solvente; la mezcla resultante se coloca sobre una lámina de cobre que hace la función de colector de corriente. Después, los electrodos se dejan secar y se procede con el calandrado, que es un proceso mediante el cual las láminas de electrodo recubiertas con el composite se someten a un tratamiento térmico y de presión que se consigue pasando las láminas a través de un conjunto de rodillos; con ello se consigue una mayor uniformidad tanto en el grado de porosidad como el espesor del composite (Hioki, 2023). Después de este tratamiento, las láminas se secan al vacío para eliminar los restos de humedad.

Etapa 3-Fabricación de celdas

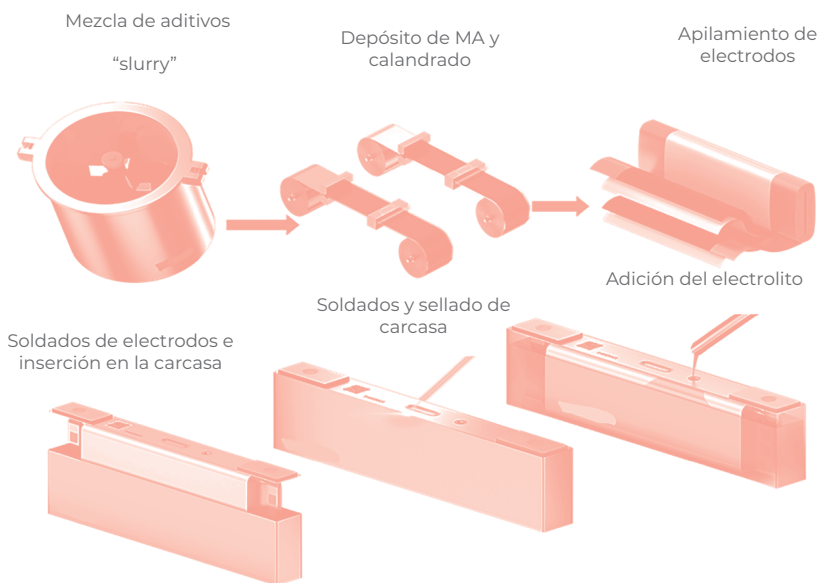
Consiste en colocar el número de electrodos —cátodo y ánodo intercalados—, separador y electrolito en condiciones herméticas para asegurar su funcionamiento. En esta etapa se debe considerar que se deben cortar los electrodos con las dimensiones requeridas dependiendo de la geometría y las capacidades a obtener. Tanto el arreglo de electrodos —apilamiento— y la colocación del separador como la adición del electrolito se realizan en condiciones inertes para evitar la formación de películas reactivas sobre los electrodos o la descomposición del electrolito, algunas de estos pasos se muestran en la figura 13.

Los prototipos de BIL suelen fabricarse en cámaras de guantes especializadas con condiciones de operación específicas, tales como concentración de oxígeno y humedad menor a 0.5 ppm, para proveer la atmósfera inerte. Los dispositivos fabricados en serie se ensamblan en un espacio cerrado que se utiliza para almacenar materiales sensibles a la humedad y

al oxígeno denominados “cuartos secos inertes”. Estos cuartos se mantienen a una humedad relativa baja y se llenan con gases inertes como el nitrógeno o el argón para reducir la cantidad de oxígeno presente en el aire.

Una vez que se tiene el arreglo se procede a soldar por separado los electrodos que conectan la parte catódica y la parte anódica de la batería y, dependiendo de la geometría, las láminas conectoras o carcasas suelen ser de un material conductor y resistente a la corrosión como el níquel. El arreglo obtenido estará listo para las pruebas electroquímicas.

Figura 13. Pasos elementales en la fabricación de una batería prismática

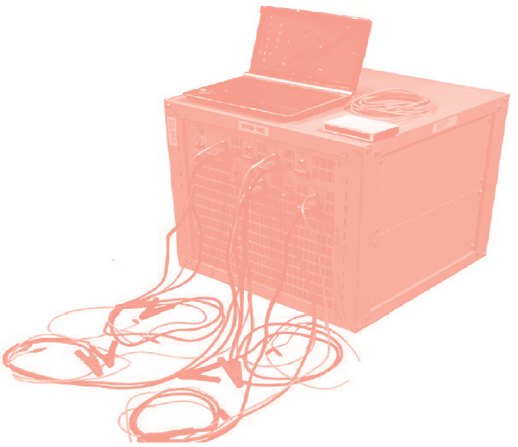


Fuente: adaptado de Hioki (2023).

Esta etapa consiste en asegurar que la batería forme las interfaces químicas estables y elimine los compuestos gaseosos formados. Es un pretratamiento necesario para que el usuario pueda utilizar las BIL sin

ningún problema de seguridad o desempeño. Para lograr la formación de interfaces, las baterías se cargan y descargan en ciclos utilizando equipos denominados potenciostatos o cicladores (figura 14) (Mtixtl, 2023). Las reacciones químicas llevadas a cabo durante el ciclado provocan la formación de la interfaz de electrolito sólido (SEI-*Solid Electrolyte Interphase*) y la interfaz cátodo-electrolito (CEI-*Cathode-Electrolyte Interphase*) que le da estabilidad a la batería.

Figura 14. Sistema ciclador para procesos de la tercera etapa



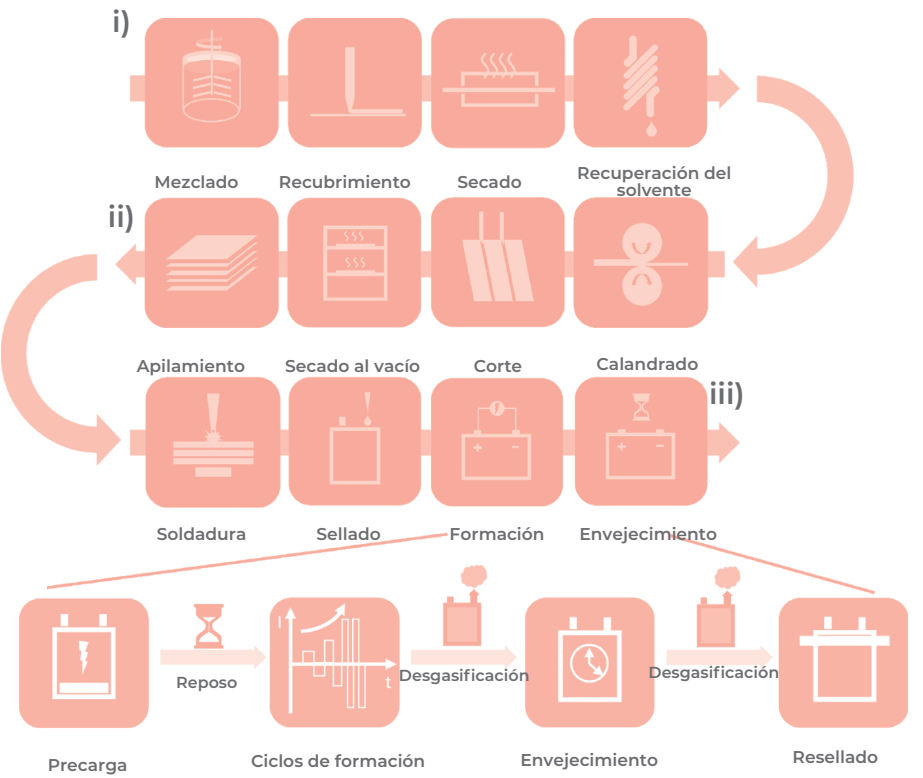
Fuente: Mtixtl (2023).

La formación de estas interfaces genera la formación de gases (tales como O_2) que son eliminados antes de la prueba de envejecimiento; después de esta prueba se vuelven a liberar los gases formados y se procede a sellar la batería para su uso comercial. Cabe mencionar que con el potenciostato o el ciclador se pueden realizar diferentes pruebas de rendimiento, pero la más utilizada para el propósito de formación es el ciclado galvanostático, el cual consiste en aplicar una corriente en sentido positivo y negativo para inducir la desintercalación e intercalación de iones –cargar y descargar la BIL. La magnitud de la corriente dependerá

de la capacidad calculada de la BIL a partir del arreglo de los electrodos. La imposición de la corriente por lo normal se gestiona en forma de tasas de corriente conocidas como "C-rate".

A manera de ejemplo, una C-rate de 1C equivaldría a cargar o descargar una BIL hasta su "máxima capacidad" en una hora; este tipo de cálculos depende directamente de la capacidad de la BIL, y por lo tanto la magnitud en C-rate varía de uno a otro tipo de batería. La figura 15 muestra un resumen del proceso global de fabricación de celdas (Liu et al., 2021).

Figura 15. Esquema de resumen del proceso de fabricación de una batería de ion de litio



Fuente: adaptado de Liu y colaboradores (2021).

En la tabla se describen los pasos, el tipo de proceso de fabricación y sus objetivos.

Tabla 3. Proceso de fabricación de celdas de baterías de ion de litio por pasos

ETAPAS	PASO	TIPO DE PROCESO	AUTOMÁTICO	OBJETIVO
Preparación de material compuesto y electrodos	Mezclado	Mecánico	Semi	Homogeneizar componentes
	Recubrimiento	Mecánico	Si	Colocar material compuesto de manera uniforme
	Secado	Térmico	Si	Evaporar solvente
	Recuperación de solvente	Térmico	Si	Evitar emisiones contaminantes
	Calandrado	Mecánico-Térmico	Si	Ajustar espesor y propiedades de porosidad
	Cortado	Mecánico	Semi	Obtener electrodos con las mismas dimensiones
	Secado al vacío	Térmico	Si	Asegurar condiciones mínimas de humedad y solventes
Configuración y arreglo de electrodos (dependiente de la geometría)	Empaquetamiento	Mecánico	Semi	Colocar varios electrodos y el separador evitando la posibilidad de corto circuito
	Soldado	Eléctrico	Semi	Unir varios electrodos con conductores metálicos
	Sellado	Térmico Mecánico	Semi	Evitar la entrada de aire y humedad
Formación de interfaces, pruebas de capacidad, reversibilidad y estabilidad.	Precarga	Electroquímico	Semi	Primer ciclo
	Ciclos de formación	Electroquímico	Semi	Formar SEI-determinación de capacidad y otros parámetros electroquímicos
	Envejecimiento	Electroquímico	Si	Asegurar funcionalidad
	Resellado	Térmico Mecánico	Semi	Evitar condiciones de humedad y aire

Fuente: elaboración propia.

Etapa 4- Fabricación de módulos y paquetes

Esta etapa está asociada al escalamiento para fabricar módulos y paquetes, detalles de este proceso se presentan en la sección siguiente.

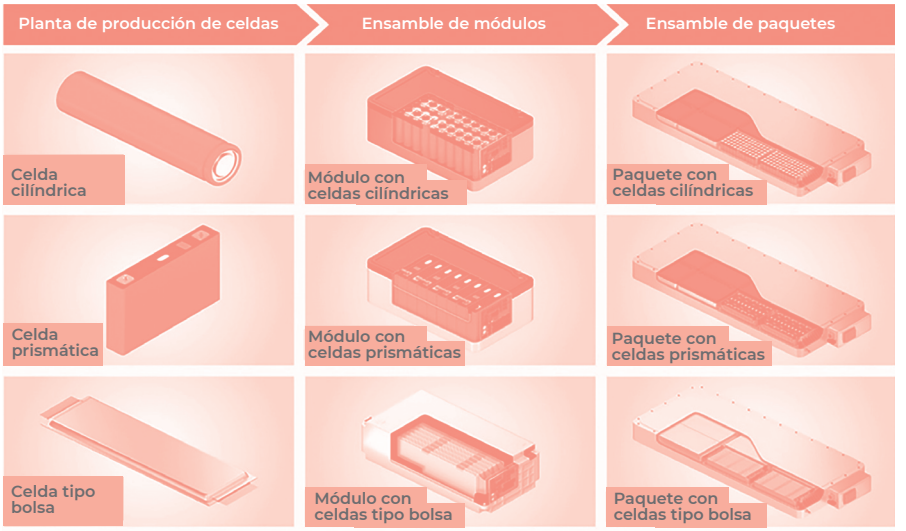
ESCALAMIENTO DE BATERÍAS DE ION DE LITIO

La manufactura de baterías requiere de una cadena de proveeduría amplia que tenga como resultados dispositivos que por sí solos puedan energizar sistemas energéticos. Sin embargo, si se requiere energizar sistemas demandantes y complejos, es necesario fabricar dispositivos más robustos considerando los niveles de escalamiento. Las BIL tienen tres niveles de desarrollo: las celdas unitarias, los módulos y los paquetes:

1. *Celda unitaria*. Consiste de manera principal en cuatro elementos: *1*) el separador, *2*) el electrolito, *3*) el ánodo y *4*) el cátodo. La composición del cátodo dicta su química y su manufactura representa el núcleo de las BIL.
2. *Módulo*. Es la conexión en paralelo o en serie de varias celdas unitarias. Se emplean para dimensionar el consumo de los equipos donde se implementan.
3. *Paquete o sistema de BIL*. El ensamble requiere módulos prefabricados, definidos por su uso en la aplicación real. Al igual que los módulos, se diseñan conectándose en serie o en paralelo.

La figura 16 presenta un esquema de la celda unitaria, la formación de un módulo y un paquete de baterías utilizando celdas cilíndricas, prismáticas o tipo bolsa (*pouch– cell*).

Figura 16. Visión general de la construcción de paquetes de baterías utilizando tres tipos de geometrías



Nota: *a*) Celdas cilíndricas, *b*) Celda prismática, *c*) Celda tipo bolsa.
Fuente: adaptado de Hioki (2023).

En el caso de las baterías, cuando se trata de escalamiento, hay dos escenarios a considerar: *1*) escalamiento en la producción y *2*) escalamiento para aplicación. El primer escenario se refiere a la fabricación de prototipos a nivel laboratorio, para que después se construya la infraestructura para escalar a una planta piloto y tener lotes pequeños; el escalamiento industrial de BIL a nivel celda es posterior; en esta etapa la fabricación de dispositivos se hace en sistemas automatizados que permiten obtener varios lotes de baterías.

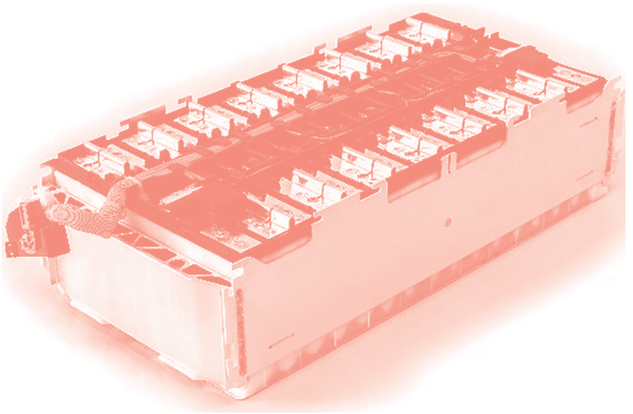
Por otro lado, el escalamiento para aplicaciones se refiere a la fabricación de módulos o paquetes (figura 16); para la obtención de módulos se lleva a cabo un proceso de ensamblaje en configuración en serie o en paralelo para lograr la diferencia de potencial y capacidad deseadas del módulo final (figura 17); el primer paso es establecer el arreglo de celdas

para después realizar las conexiones y soldarlas; en este punto, se integra el sistema de monitoreo y control (BMS, por sus siglas en inglés), que permite estimar:

1. Estado de carga.
2. Estado de salud.
3. Balanceo del voltaje.
4. Control de carga y descarga.
5. Manejo térmico.
6. Pronóstico y detección de fallas.
7. Protección de la BIL.
8. Adquisición de datos.

El BMS también hace posible ecualizar las capacidades y extraer parámetros que permitan controlar el rendimiento del módulo, la seguridad y maximizar su vida útil. Al igual que las celdas, el módulo también está confinado en una carcasa y sellado para evitar cualquier daño estructural.

Figura 17. Ejemplo de un módulo de baterías prismáticas para la formación de paquetes destinados a su implementación en vehículos eléctricos



Fuente: Hioki (2023).

Para la fabricación de paquetes se debe identificar la aplicación o el sistema a implementar. A partir de ello, se definen parámetros como las necesidades energéticas, la potencia máxima y la autonomía, el intervalo de temperatura de trabajo, así como consideraciones de seguridad y condiciones de manejo. Todas estas variables se usan para dirigir la formación del sistema de baterías. Una vez definidos los parámetros, los módulos se unen mediante conexiones más robustas y, dado que en esta configuración las posibles aplicaciones son más demandantes, se debe garantizar por completo la seguridad de los paquetes; por este motivo, en ellos se implementan y adaptan sistemas de enfriamiento, conexiones mecánicas, arneses de alta seguridad, sistemas electrónicos maestros, electrónica de potencia y controladores.

Para paquetes de baterías de automóviles, se requiere usar tecnologías de modos de unión como soldadura ultrasónica, montaje mecánico de ajuste forzado, soldadura láser o por puntos de resistencia, entre otros. También se deben considerar las soldaduras por fricción, por agitación y con gas inerte de tungsteno, unión por formación y unión adhesiva. La selección del método dependerá del tipo de aplicación final del paquete de batería requerido.

ANTEPROYECTO DE PLANTA PILOTO DE FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE IONES LITIO

Si bien el horizonte para la obtención de sales de litio y fabricación de baterías con recursos nacionales se plantea a mediano y largo plazo, el Estado mexicano puede implementar acciones para incursionar lo más pronto posible en el desarrollo de prototipos de BIL considerando por el momento utilizar proveeduría internacional para solventar las necesidades de los minerales estratégicos que aún no se producen en el país, tales como carbonato o hidróxido de litio. Además, es necesario hacer las indagaciones y articulaciones correspondientes para determinar proveeduría nacional o internacional de los componentes a utilizarse para ensamble

de BIL y síntesis de MA mencionados en la tabla 1 y 2 o, en su defecto, proveedores de MA para su uso a nivel industrial.

Sin embargo, independientemente de la potencial fabricación nacional de BIL en México un paso previo es la definición de dos aspectos fundamentales para la planeación exitosa de una planta piloto de fabricación de BIL (PPFB). Estos aspectos se relacionan con seleccionar y definir la geometría de BIL a desarrollarse y el mercado al que se dirigirá la producción.

Estudio de demanda de la geometría

En la figura 12 se presentaron las cuatro geometrías principales utilizadas para fabricar BIL, cada una de ellas está diseñada para implementarse en una aplicación específica, aunque en algunos casos las geometrías pueden ser intercambiables se suele limitar estas acciones en términos de su facilidad de manipulación, la ingeniería involucrada en su implementación, la seguridad y los costos. En el caso de la electromovilidad se prefiere utilizar la geometría prismática por cuestiones de costos y seguridad por las inminentes condiciones de uso exhaustivo en un vehículo (ya sea en transporte público o particular). Debido a que la electromovilidad es uno de los sectores donde se enfoca un mayor esfuerzo para tener una mayor incidencia en la población, la selección de la geometría estaría basada, pero no limitada, a ocupar BIL prismáticas de LFP.

Por lo tanto, el principal mercado al que se debe dirigir la potencial fabricación de BIL debería ser al del transporte colectivo. Aunque el cálculo de la demanda es un ejercicio en el que se debe trabajar, sin duda aumentará exponencialmente con el paso de los años permitiendo el flujo de recursos y la recuperación de la inversión pudiendo escalar la producción.

Una vez definidas la geometría y demanda, es necesario mencionar que para el anteproyecto de la PPFB se sugiere la creación de colaboraciones entre diferentes actores, entre gobierno, IES, CP, centros de investigación y la iniciativa privada aplicando el modelo mexicano de innovación soberana para el bienestar impulsado por el Conahcyt.

La creación de una PPFB además de producir BIL permitirá paralelamente generar conocimiento asociado a esta tecnología fortaleciendo las capacidades y formación de personal especializado (ver tabla de perfiles en la sección de talento especializado para los eslabones de la cadena de valor de baterías de ion de litio) en las diferentes áreas de producción. El dominio de este saber hacer permitirá proponer mejoras para potencialmente incursionar en otras geometrías, otras químicas y otros campos de aplicación.

Consideraciones alternas en el establecimiento de la PPFB

1. El mercado más fuerte, conforme a los ejercicios de proyección, es el de la electromovilidad: vehículos eléctricos e híbridos. Este mercado demanda en su mayoría baterías de tipo prismáticas y cilíndricas por cuestiones de seguridad. Sin embargo, las geometrías adicionales pueden insertarse dependiendo de la aplicación, puesto que algunas de ellas requerían de dispositivos más flexibles como las BIL tipo bolsa.
2. Considerar actores para la articulación con instituciones de gobierno, asociaciones y sector privado para generar demandas de infraestructura para la recarga, pública y residencial del transporte colectivo, y la planeación urbana que habilite un transporte público eficiente con infraestructura verde.
3. El segundo mercado de mayor importancia con respecto a la electromovilidad se enfoca en la electrónica portátil, cuyos formatos geométricos más extendidos son los de tipo bolsa.
4. El almacenamiento de energía para aplicaciones estacionarias (residencial e industrial) es otro sector creciente. Esta aplicación podría utilizar los anteriores formatos geométricos además del prismático.
5. La aplicación de almacenamiento estacionario se destaca por su característica de concatenarse con otras formas de generación de energía intermitentes como solar, eólica, térmica, etc. Este modelo promueve la independencia energética por las condiciones

geográficas del país puesto que se puede habilitar el acceso a servicios energéticos para poblaciones alejadas de la red de distribución central eléctrica.

6. La reutilización (segunda vida) y reciclado de baterías constituye un sector incipiente, pero con potencialidad económica y promotor de economía circular con los beneficios ambientales asociados. Esta área tiene potencialidad de implementación rápida y retroalimenta al eslabón de "beneficio y transformación" y, consecuentemente, al de la manufactura de baterías de ion de litio.

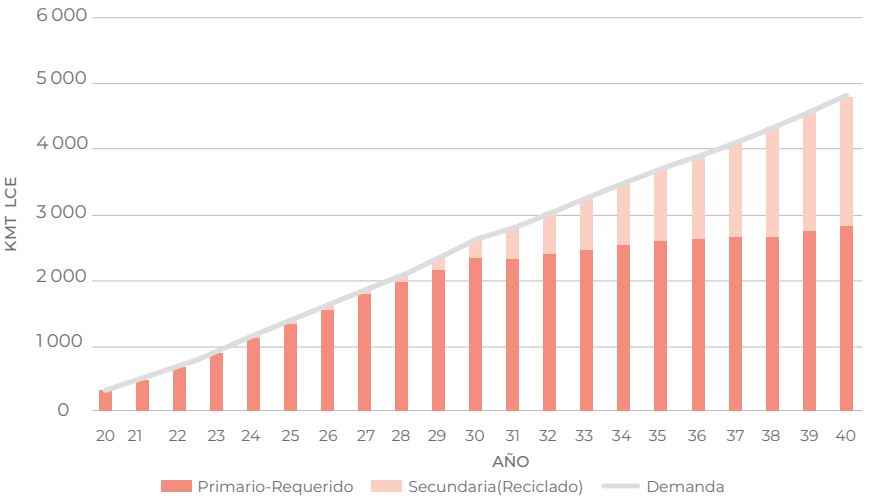
ECONOMÍA CIRCULAR PARA UN DESTINO ALTERNATIVO DE BATERÍAS DE ION LITIO USADAS

La economía circular de BIL se refiere a un enfoque sostenible que busca maximizar su vida útil, minimizar el desperdicio y promover la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materiales valiosos a lo largo de la cadena de valor de las baterías. Esto es fundamental por el crecimiento en la demanda de BIL para distintas aplicaciones, como vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía. Con el tiempo, la demanda de BIL será tan alta que las reservas de minerales de litio no serán suficientes para satisfacerla, sin embargo, de acuerdo con la figura 18 la aplicación de estrategias de reciclaje de BIL para la obtención de compuestos de litio contribuirá a partir del 2026 al suministro de litio para su fabricación (Jimenez, 2023).

Las BIL tienen vidas útiles bastante prolongadas debido a su alta eficiencia. No obstante, una vez que cumplen su ciclo de vida suelen convertirse en residuos, aunque en algunos casos y para algunas aplicaciones la batería todavía sea funcional. En México las baterías se consideran parte de dos tipos de residuos, peligrosos y de manejo especial, los cuales están sujetos a un plan de manejo. A pesar de ello, en México no existe un plan de manejo para las BIL en la actualidad, por lo que un gran porcentaje es desechado sin un tratamiento previo.

La vida útil real de una batería LFP varía en función de varios factores, como la temperatura ambiente, el nivel de carga y descarga, la frecuencia y el tipo de aplicación. En este sentido, la vida útil de una batería de litio LFP oscila entre 500 y 1 100 ciclos completos de carga, e incluso después de 3 000 ciclos, la BIL de LFP aún podría tener disponible un 80 % de su carga nominal, por lo que es importante considerar aplicaciones de segunda vida. Estos dos enfoques deben considerarse para ser integrados en procedimientos que beneficien y generen valor a la población mexicana en un tipo de economía circular que involucre las principales etapas de un reciclado controlado y aplicaciones de segunda vida.

Figura 18. Prospectiva del suministro primario, secundario y la demanda de litio de 2020 a 2040 y contribución de material reciclado al suministro de litio a partir de 2026



Nota: Tonelada kilométrica equivalente de carbonato de litio (kMT LCE).
Fuente: adaptado de Jiménez (2023).

Una estrategia que es imprescindible para el manejo de baterías usadas y para detonar actividades de reciclaje controlado es la ejecución de programas de recolección. Estos programas ya se han implementado en

algunos centros de educación superior y podrían extenderse a empresas, oficinas, plazas públicas y centros comerciales. Sin embargo, en los recipientes colocados para la deposición se suele encontrar una gran variedad de dispositivos de almacenamiento diferentes a las BIL. Por ello, primero se necesita una clasificación. Durante esta etapa, se identifican y separan los dispositivos que contienen las BIL o las BIL independientes.

El destino de las BIL identificadas consta de dos caminos: *1*) enviar al reciclaje controlado para la recuperación de materiales valiosos o *2*) someterlos a una serie de pruebas electroquímicas para determinar si son aptas para aplicaciones de segunda vida en sistemas de menor demanda energética, lo cual puede ser aplicado para BIL a nivel celda, módulo o paquete.

Los pasos posteriores a la clasificación, que permiten determinar el camino a seguir de las BIL, se resumen a continuación:

1. *Análisis visual.* Se refiere a determinar si los dispositivos presentan o no daños físicos, tales como abolladuras, presencia de óxidos, acumulación de gases, desprendimiento de carcasa, pérdida de electrodos, etc.
2. *Obtención de parámetros físicos.* Si los dispositivos aparentan estar en buen estado, se procede a la obtención de parámetros como el peso, las dimensiones, la geometría y el potencial. Estos parámetros ayudarán a determinar si las BIL pueden ser susceptibles de pasar a la etapa de aplicación de protocolos electroquímicos, así como a su posterior evaluación para aplicaciones de segunda vida.

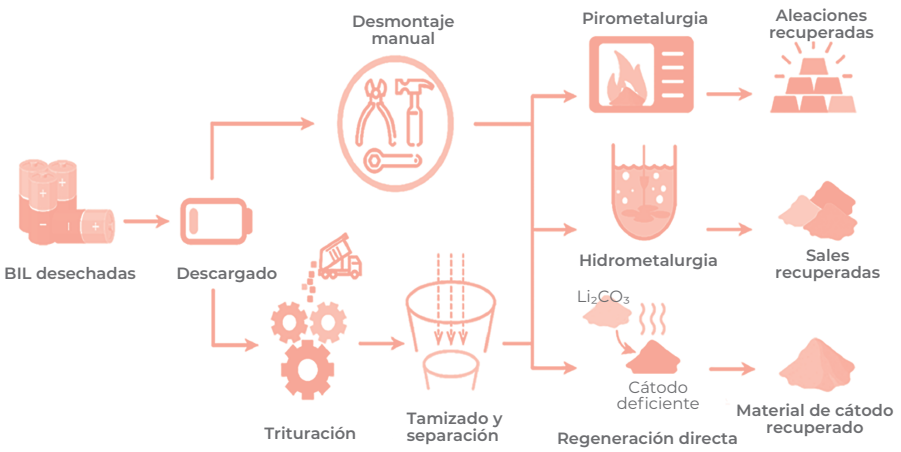
Reciclado controlado para la obtención de materiales valiosos

Si después del análisis visual se determina que los dispositivos están muy dañados, estos se preparan para su reciclaje. Un método muy usado es la trituración en sistemas acuosos —solventes base agua—, en este proceso las BIL en todas sus presentaciones son transportadas hacia un molino

que las tritura en solventes neutros hasta obtener lo que se conoce como *masa negra*. Esta masa contiene diferentes materiales y compuestos, y tras tratamientos fisicoquímicos y químicos pueden obtenerse metales, plástico y productos individuales de carbonato de litio y manganeso, sulfato de cobalto, cobre, níquel, hierro, sodio, óxidos de aluminio y grafito, con niveles de pureza necesarios para la producción de cátodos y precursores.

En la figura 19 se muestran algunas de las rutas y métodos más utilizados para la obtención de minerales valiosos a partir de baterías usadas (Akhmetov et al., 2023). Los materiales del cátodo y del ánodo se transforman en productos finales de grado batería para reutilizarlos en la producción de nuevas BIL u otras aplicaciones de la economía general. Es necesario considerar que las BIL tratadas para reciclaje deben estar descargadas al momento de triturarlas para evitar riesgos. Detalles de los procesos de extracción son presentados en el capítulo 3, en la sección de recuperación de litio de baterías gastadas.

Figura 19. Esquema general de las rutas de reciclado de cátodos de baterías de ion de litio



Fuente: adaptado de Akhmetov y colaboradores (2023).

Segunda vida

Si las BIL analizadas no presentan daños evidentes y si en la medición de potencial el valor es aceptable, éstas se convierten en candidatas para pasar a la etapa de aplicación de protocolos electroquímicos. En esta etapa los dispositivos son sometidos a una serie de pruebas basadas en técnicas electroquímicas que permiten obtener parámetros más específicos como la capacidad de la BIL, la ventana de potencial de trabajo, el estado de salud, el estado de carga, el grado de reversibilidad, el grado de estabilidad, la impedancia del dispositivo, la eficiencia coulómbica y el grado de degradación. Esta información se usa para determinar si en escenarios hipotéticos las BIL pueden seguir funcionando y si pueden aplicarse a sistemas de mediana y baja demanda.

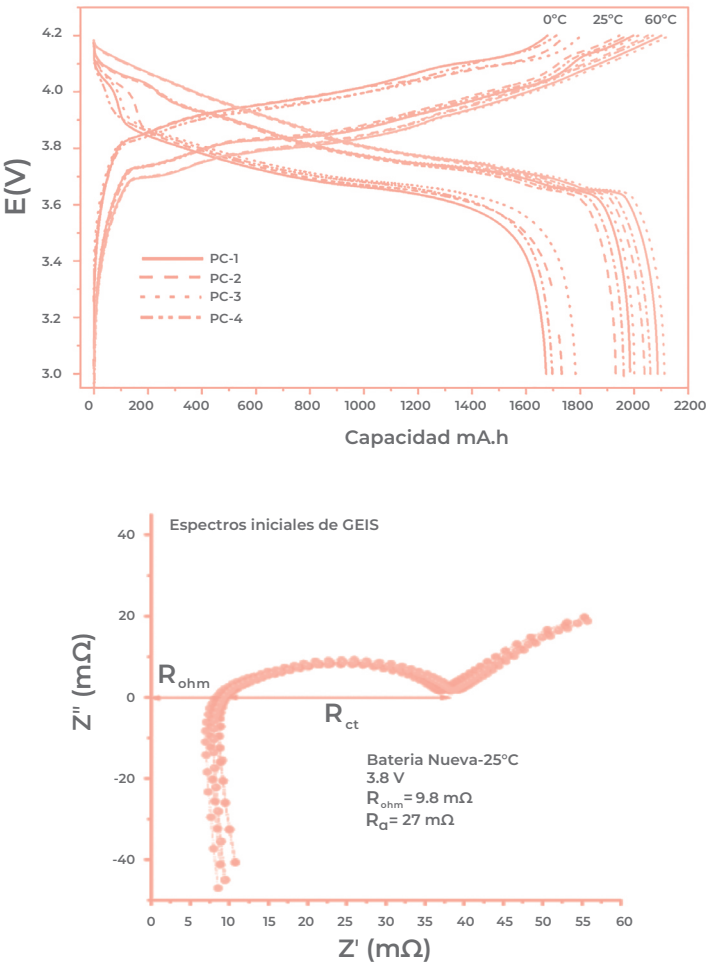
La figura 20 muestra un ejemplo de gráficas obtenidas con la aplicación de las técnicas más utilizadas en protocolos electroquímicos. La figura 20a corresponde a la respuesta electroquímica de la batería a la técnica de "ciclado galvanostático con límite de potencial", que permite, entre otros parámetros, determinar la capacidad de la batería bajo diferentes condiciones de operación.

La figura 20b presenta un espectro de impedancia en su forma de diagrama de Nyquist, la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS-siglas en inglés para *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) permite entre otros parámetros determinar la resistencia asociada al funcionamiento de los dispositivos (Suarez-Hernandez et al., 2023). Analizando estas gráficas se puede determinar si una celda, módulo o paquete es apto para implementarse en sistemas de media y baja demanda para darle una segunda oportunidad de funcionamiento.

La implementación exitosa de la economía circular de baterías de litio requiere la cooperación entre la industria, el gobierno y la sociedad para establecer políticas y regulaciones adecuadas, promover la inversión en tecnologías de reciclaje y fomentar la conciencia y la educación sobre la importancia de este enfoque sostenible. Así se contribuye a la

conservación de recursos naturales y se reduce la huella de carbono de la producción y disposición de baterías de litio.

Figura 20. Respuesta electroquímica de baterías de ion de litio



Nota: *a*) Perfiles de carga y descarga de BIL utilizando ciclado galvanostático. *b*) Espectro de impedancia electroquímica de una BIL en su forma de diagrama de Nyquist.
Fuente: adaptado de Suárez-Hernández y colaboradores (2023).

IDENTIFICACIÓN DE CAPACIDADES VIRTUOSAS PARA DETONAR LA FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE ION LITIO EN MÉXICO

Para impulsar la fabricación de BIL en México, es fundamental identificar y desarrollar capacidades virtuosas que contribuyan al crecimiento sostenible y competitivo de esta industria. Las capacidades virtuosas son aquellas habilidades y competencias distintivas que permiten a una entidad o país destacarse en un área específica.

ESTRATEGIA DE IDENTIFICACIÓN, CAPACIDADES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS NACIONALES

La estrategia de identificación fue basada en una herramienta de diagnóstico emitida desde el Conahcyt para el mapeo inicial de las capacidades. Con preguntas concretas difundidas en humanidades, ciencias, tecnologías e innovación (HCTI), se identificaron instituciones y actores que conocen los aspectos en la cadena de valor de baterías, lo que permitió determinar las capacidades y oportunidades en esta área.

Las capacidades nacionales en investigación son: desarrollo tecnológico e innovación de BIL y elementos auxiliares necesarios según las distintas aplicaciones. El proceso de fabricación de baterías (celdas) en sus diferentes geometrías es muy estricto, y el ejercicio de búsqueda de información indica que en el sector industrial no existen fábricas de estas en México. Sin embargo, sí existen otras capacidades que, de explotarse a plenitud, pueden coadyuvar a que el diseño de baterías se convierta en una industria competitiva.

Con el mapeo, se identificaron instituciones nacionales, universidades públicas, centros de investigación y CP del Conahcyt. Varias de las instituciones participantes identificadas ya tienen desarrollos tecnológicos y logros a nivel celda en escala laboratorio. Además, se identificaron capacidades tecnológicas nacionales para el diseño de la electrónica de potencia

requerida por los módulos y paquetes, por parte de centros de investigación. Las actividades en las que más se tienen logros son las siguientes:

1. Preparación de electrodos anódicos y catódicos.
2. Manufactura de prototipos de celdas tipo bolsa –*pouch cell*– y tipo moneda o botón.
3. Pruebas de calidad en baterías experimentales y comerciales.
4. Pruebas en celdas experimentales con diferentes químicas.
5. Pruebas de concepto de nuevos materiales activos basados en azufre, cobre, sodio y silicio, entre otros.
6. Pruebas de concepto de nuevos aditivos: aglutinantes, electrolitos, arreglos experimentales, etc.
7. Integración de celdas tipo botón.
8. Control de propiedades y desarrollo de métodos de manufactura.
9. Experiencia en escalamiento.
10. Adaptación de celdas de gran formato.
11. Pruebas electroquímicas en baterías comerciales cilíndricas, prismáticas, *pouch cell*, módulos y paquetes.
12. Desarrollo de sistemas de gestión térmica para módulos y paquetes.
13. Reconversión de vehículos de diésel a eléctricos.
14. Fabricación de vehículos de transporte público 100% eléctricos.
15. Pruebas de control de calidad en módulos de baterías LFP.
16. Protocolos de evaluación avanzados basados en espectroscopía de impedancia electroquímica.

Con esta información, se planea en la actualidad junto con la paraestatal Litio para México (LitioMx) una estrategia de articulación con las instituciones para generar acciones específicas, alianzas y soporte en materia de investigación, desarrollo tecnológico –manufactura de BIL– e innovación, con base en la disponibilidad actual y la formación de talento especializado que habiliten, en el menor tiempo posible y en distintos horizontes, el desarrollo de este eslabón de la cadena de valor del litio, con

un componente nacional mayoritario, en favor de la independencia tecnológica, con irrestricto cuidado del medio ambiente y en beneficio de las y los mexicanos.

CONTRIBUCIONES ESPECÍFICAS DE INSTITUCIONES NACIONALES PARA FORTALECER Y COADYUVAR A LA FABRICACIÓN DE BATERÍAS DE ION LITIO EN EL CORTO Y MEDIANO PLAZO

Para disminuir los tiempos de desarrollo tecnológico e implementación es indispensable articular acuerdos entre la comunidad científica, el sector productivo y la sociedad. En primer lugar, a nivel nacional tienen que propiciarse las articulaciones y colaboraciones en torno a una agenda nacional. La siguiente lista destaca de manera específica las posibles contribuciones de instituciones públicas que cuentan con laboratorios, equipos y personal experimentado con líneas de investigación sólidas en materia de manufactura de baterías, componentes y aditivos:

1. Investigación sobre materiales activos de cátodo, ánodo electrolito y aditivos, nuevos procesos de preparación de electrodos, pruebas bajo normativa de celdas experimentales y comerciales, fabricación de prototipos de baterías tipo moneda y tipo bolsa (*pouch cell*).
2. Desarrollo de materiales para el almacenamiento de energía basados en óxidos metálicos, polímeros de coordinación y materiales de carbón.
3. Producción de fibras de silicio con carbón para ánodos de baterías de ion de litio. La técnica de producción tiene potencial de escalamiento industrial.
4. Experiencia en el diseño de nanomateriales para fabricación de electrodos de baterías.
5. Síntesis y caracterización de materiales anódicos.
6. Capacidades para desarrollar materiales poliméricos para membranas y aglutinantes.

7. Síntesis de materiales para baterías de ion litio, escalamiento de la síntesis de nanotubos de carbono para aplicaciones en BIL.
8. Recuperación, reciclado de materiales de las baterías usadas, normatividad, pruebas, capacidad, vida media.
9. Síntesis de materiales e infraestructura de un sistema integrado para hacer y probar celdas de litio tipo moneda.
10. Motores eléctricos, ensamblaje, pruebas, integrado de baterías para conversión a vehículos eléctricos, desarrollo de motores eléctricos y sistema de manejo de baterías, electrónica de potencia y desarrollo de controladores de motores eléctricos.

CONSIDERACIONES PARA LA ARTICULACIÓN INTERNACIONAL EN MATERIA DE BATERÍAS DE ION LITIO

La colaboración internacional en el área de baterías es fundamental para el avance tecnológico y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles en México y en el mundo, primordialmente la colaboración regional con países de América Latina en el ámbito de las baterías de ion litio podría ser beneficiosa para impulsar el desarrollo sostenible, la tecnología y la transición hacia fuentes de energía más limpias. Algunas consideraciones importantes para que México participe en colaboraciones internacionales en este campo incluyen:

1. *Acceso a tecnología avanzada.* México puede beneficiarse de la colaboración internacional al tener acceso a tecnologías de vanguardia y conocimientos especializados en la fabricación y desarrollo de baterías. Esto aceleraría la adopción de soluciones de almacenamiento de energía más eficientes y limpias en el país.
2. *Desarrollo de capacidades locales.* La colaboración internacional puede ayudar a México a desarrollar capacidades locales en la investigación, desarrollo y producción de baterías. Esto puede impulsar

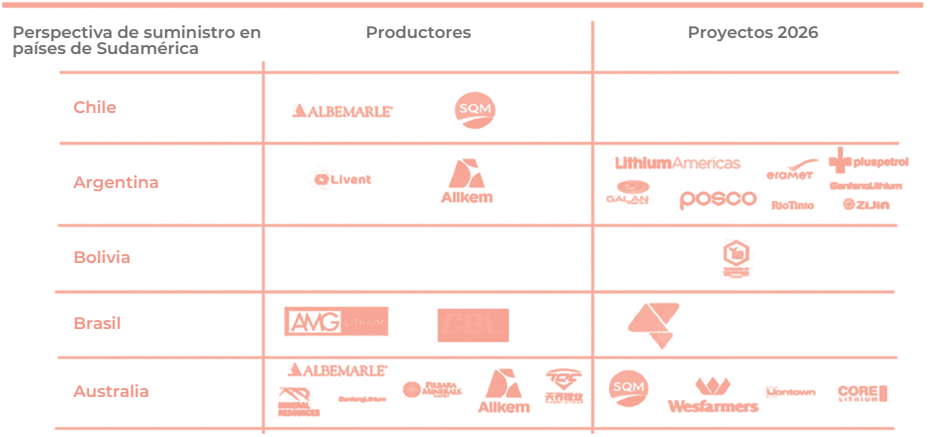
la creación de empleos y el crecimiento de la industria de baterías en el país.

3. *Integración en cadenas de suministro globales.* Participar en colaboraciones internacionales puede permitir a México integrarse en las cadenas de suministro globales de baterías, lo que sería beneficioso para la economía del país y su posición en el mercado mundial. Incluso es posible proponer articulaciones con empresas que tienen mayor impacto en la cadena de suministro de América Latina. Estas empresas pueden –si se logran acuerdos beneficiosos para ambas partes– proveer consumibles para el desarrollo inmediato del eslabón de baterías. La figura 21 muestra estas empresas y su país correspondiente; destaca por su puesto el triángulo de litio conformado por Bolivia, Chile y Argentina (Jimenez, 2023).
4. *Normativas y estándares globales.* Colaborar con otros países en el desarrollo de normativas y estándares para las baterías garantiza que los productos mexicanos cumplan con las regulaciones internacionales, lo que facilita el comercio y la exportación de baterías.
5. *Acceso a financiamiento.* La colaboración internacional puede abrir puertas para acceder a financiamiento y recursos de investigación compartidos, lo que reduce la carga financiera para el desarrollo de tecnologías de baterías en México.
6. *Compartir buenas prácticas.* A través de la colaboración, México puede aprender de las experiencias y buenas prácticas de otros países en términos de sostenibilidad, eficiencia y seguridad en la producción y uso de baterías.
7. *Contribución a la sostenibilidad.* La colaboración internacional en el área de baterías puede ayudar a México a cumplir sus objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones al fomentar la adopción de tecnologías de almacenamiento de energía más limpias y eficientes.
8. *Gestión de residuos.* Es importante considerar la gestión adecuada de los residuos de baterías, especialmente con el aumento en su

producción y uso. La colaboración internacional puede proporcionar conocimientos especializados sobre las mejores prácticas en reciclaje y tratamiento de baterías usadas.

La colaboración internacional en el área de baterías puede ser beneficiosa para México al acelerar el desarrollo de tecnologías de baterías, promover la creación de empleos, fortalecer la integración regional en materia productiva, así como la posición de México en el mercado global y contribuir a los objetivos de sostenibilidad. Sin embargo, es esencial establecer acuerdos claros y mantener como objetivos el beneficio mutuo y la sostenibilidad a largo plazo.

Figura 21. Empresas de mayor impacto que se podrían articular con el Gobierno de México para el fortalecimiento de la cadena de valor de BIL



Fuente: adaptado de Jiménez (2023).

FORTALEZAS DE MÉXICO EN INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN PARA ACELERAR EL CONOCIMIENTO Y DESARROLLO DE BATERÍAS DE ION LITIO

Las tres actividades de este apartado –investigación, desarrollo tecnológico e innovación– se encuentran en diferentes estatus y requieren atención en diferente medida. A continuación, se presenta la información más destacada a partir de un ejercicio colaborativo en el que aún se requiere profundizar.

INVESTIGACIÓN

Hay importantes instituciones y grupos de trabajo dedicados a BIL y áreas asociadas, y están bien identificados. Las temáticas de investigación se centran en químicas para electrodos con posibilidad de inserción en el mercado para el horizonte medio (2030 o más), como Li-S, Li-Si, LFP, iones de sodio (Na-ion), entre otras, así como el desarrollo de celdas, la optimización de métodos de fabricación, de seguridad, implementación de celdas en módulos y la integración de simulaciones para optimizar el funcionamiento global. En esta área, se recomienda:

1. Crear alternativas de financiamiento de infraestructura para fortalecer a los grupos de investigación existentes mediante el escalamiento más allá del laboratorio. Los equipos para hacer manejo y ensamblaje de celdas son más costosos que los equipos promedio, pues requieren control atmosférico preciso: humedad y oxígeno menor a 0.5 ppm. La inversión en infraestructura necesaria es

costosa, y explica la ventaja de grupos internacionales con un desfase de más de dos décadas. En particular, es necesario crear colaboraciones entre grupos para hacer uso eficiente de la infraestructura que posee cada uno, así mismo se recomienda que los grupos con mayor experiencia compartan sus conocimientos y enfoquen esfuerzos hacia un objetivo común para el desarrollo de México.

2. Impulsar, a través de proyectos de frontera, la investigación en nuevas químicas con potencial de inserción en el mercado en el futuro cercano. Estos apoyos deberán justificarse en la capacidad para generar productos a escala industrial; o bien en prototipos en el horizonte de tiempo donde se espere que aparezcan estas baterías en el mercado internacional. Es importante que los desarrollos en materiales estén acompañados de desarrollos en el mejoramiento de los electrodos, como el control de la porosidad, tortuosidad, distribución de corriente y cuestiones prácticas como la adhesión y estabilidad mecánica.
3. Fomentar el desarrollo de métodos de manufactura avanzados de electrodos, celdas y módulos que permitan mejorar la productividad.
4. Desarrollar sistemas de estimación del estado de carga y de salud de las baterías, balance de voltaje y limitación de corrientes de carga y descarga.
5. Promover desarrollos tecnológicos que aumenten la autonomía, la densidad de potencia, la densidad de potencia del sistema de almacenamiento, la electrónica de potencia y los motores eléctricos.
6. Disminuir el costo de los sistemas asociados a los materiales, pero también a los inversores DC-DC para control de motores eléctricos, los cargadores a bordo, trenes de potencia, motores eléctricos y electrónica de potencia.
7. Explorar la participación y concurrencia con el sector privado.
8. Crear un centro unificado de fabricación de prototipos de baterías

como detonante para los desarrollos industriales, fortalecimiento de recursos humanos y capacidades de innovación. El centro unificado debe considerar a las universidades y centros de investigación con más experiencia como líderes en desarrollo de componentes de BIL.

DESARROLLO TECNOLÓGICO

En materia de desarrollo tecnológico se llegó a las siguientes recomendaciones:

1. La química LFP ($LiFePO_4$) presenta un crecimiento mercantil y cuentan con una madurez tecnológica. Se espera ganancia de cuota del mercado en el futuro medio (2030). Es necesario incentivar la producción de estos materiales desde laboratorio a escala industrial, así como la colaboración entre gobierno, academia e industria, para lograr desarrollos acelerados en esta medida.
2. El mercado actual está dominado por las BIL de química NMC con bajo contenido de cobalto. Se precisa favorecer desarrollos tecnológicos y proyectos que busquen generar químicas de este estilo que no infrinjan patentes internacionales.
3. Existen muchas ventajas en torno a la fabricación de baterías LFP por ser una tecnología madura y de bajo costo. Además, la implementación de la industria BIL basada en la química LFP facilitaría la soberanía del litio mexicano, y ofrecería rentabilidad a escala nacional. Los desarrollos se deben enfocar en mejorar las propiedades de LFP y que los electrodos obtenidos tengan mejores características que los productos comerciales.
4. Desarrollar métodos de producción alternativos de electrodos que permitan disminuir los costos, aumentar la densidad energética de los electrodos y favorecer la seguridad, sustentabilidad y economía del proceso global.

5. Propiciar y financiar alianzas favorables intersectoriales siguiendo el modelo pentahélice —academia, gobierno, industria, sociedad y cuidado del medioambiente— con la intención de acelerar desarrollos de este estilo.
6. El sector privado nacional tiene participación en este rubro con desarrollo de vehículos eléctricos para aplicaciones diversas y en el país se vislumbra potencial para producir BIL a nivel celda.
7. Desarrollar tecnología tanto para fabricar celdas como para escalar los procesos de síntesis.
8. Impulsar desarrollos tecnológicos asociados a la mejora de control térmico, mecánico y eléctrico de los módulos de baterías con mejoras en ciclo de vida y seguridad.
9. Integración de controladores, reconversión.

INNOVACIÓN

Las siguientes innovaciones en sistemas de baterías de litio tienen un gran potencial para transformar la industria de la energía y la movilidad, haciendo que las tecnologías de almacenamiento de energía sean más eficientes, seguras y respetuosas con el medio ambiente.

1. Las innovaciones en la composición química y el diseño de las baterías de litio han permitido incrementar la densidad de energía, lo que significa que pueden almacenar más energía en el mismo espacio. Esto es importante en dispositivos portátiles y vehículos eléctricos, ya que aumenta la autonomía.
2. Innovaciones en el proceso de fabricación de electrodos, aumento de la densidad energética, disminución de los costos, procesos de producción sin solventes, interfaces sólido-electrolito artificiales y nuevos esquemas de procesamiento.
3. Desarrollo de nuevas empresas y fortalecimiento de las que trabajan en alguna área de BIL, tanto empresas mexicanas o

extranjeras con un amplio porcentaje nacional a través de instrumentos de colaboración intersectorial pentahélice –academia, gobierno, industria, sociedad y cuidado del medioambiente en el marco de una agenda de Estado.

4. Financiamiento concurrente en desarrollos e innovación a escala industrial.
5. Desarrollos tecnológicos basados en inteligencia artificial y aprendizaje de máquina en cada una de las etapas y del control de los sistemas de baterías.
6. Sistemas de carga proveniente de energía renovable.
7. Sistemas de carga de forma ultrarrápida.
8. Diagnóstico de baterías y pronóstico de fallas *on-board*.
9. Desarrollo de sistemas de la siguiente generación: electrónica de potencia inteligente, conectividad vehicular, predictores de riesgo, manejo térmico y planeación inteligente de carga.
10. Trabajar en soluciones de reciclaje más eficientes para baterías de litio, recuperando materiales valiosos y reduciendo el impacto ambiental.
11. Las baterías de litio están siendo cada vez más utilizadas en sistemas de almacenamiento de energía a nivel de red, para permitir el almacenamiento de energía generada a partir de fuentes renovables.
12. Se han implementado innovaciones en la seguridad de las baterías de litio, como sensores y sistemas de extinción de incendios, para prevenir y mitigar los riesgos de incendio y explosión.

PERFIL DE TALENTO ESPECIALIZADO PARA LOS ESLABONES DE LA CADENA DE VALOR DE BATERÍAS DE ION LITIO

En los próximos años, la necesidad de aumentar la contratación de personal con habilidades especializadas en el área de almacenamiento de

energía, incrementará por la inminente transformación del sector energético orientado al desarrollo de BIL. Una de las grandes razones por las que la industria de las baterías está despertando el interés no sólo en México, sino en diversos países, es la creación de empleos que se espera puedan generar toda la cadena de valor vinculada a este sector. La variedad de empleos y perfiles que exigirá la industria de fabricación de BIL es la que refuerza la idea de que esta industria será una de las grandes catalizadoras del mercado laboral en los próximos años en varios países. Debido a las distintas actividades en cada etapa de fabricación, implementación, reparación, disposición, segunda vida y reciclaje de BIL, se estarán exigiendo desde perfiles técnicos hasta perfiles con altas competencias y multivalentes.

El fortalecimiento y creación de nuevas carreras, posgrados o incorporación de líneas de investigación asociadas, será necesario para generar talento humano altamente especializado en las áreas que comprende la cadena de valor de BIL, éstas deben orientarse a la investigación de nuevos materiales, a fomentar la capacidad para transitar de la investigación fundamental o de ciencia básica al desarrollo tecnológico, desarrollo de tecnologías subsecuentes, diseño de sistemas de gestión de baterías y electrónica asociada.

También es preciso crear carreras industriales y técnicas para operadores y personal en áreas de manufactura, entre otros. Por estas razones, para lograr una transición energética eficiente, el personal involucrado deberá poseer diversas habilidades para insertarse de manera exitosa en la cadena de valor de BIL. En este sentido las etapas donde se requerirá el talento especializado son:

a. Fabricación de electrodos y celdas.
b. Fabricación de módulos y paquetes.
c. Aplicaciones e implementación.
d. Segunda vida y reciclaje.
e. Perfiles transversales.

A continuación, se presenta una serie de tablas con las propuestas de la preparación académica, habilidades y conocimientos requeridos en cada etapa mencionada.

Tabla 4. Perfiles académicos para la etapa de fabricación de electrodos y celdas

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES RELACIONADOS
Perfil Técnico	· Técnicos en procesos productivos · Técnicos en procesos industriales · Técnicos laboratoristas	En baterías de ion litio BIL, fundamentos de electroquímica, ciencias y química de materiales, operaciones unitarias (mezclado, decantado, evaporación, secado etc.), procesos de producción, su escalamiento y mejora continua. Manipulación de muestras, manejo de equipos especializados, normas oficiales, normas ISO
Perfil profesional-licenciatura o Ingeniería	· Ingeniería química · Licenciatura en química · Ingeniería en energías renovables · Ingeniería en ciencia de materiales · Ingeniería en nanotecnología	Sólidos conocimientos en baterías de ion litio BIL, electroquímica avanzada, ciencias y química de materiales, operaciones unitarias, procesos de producción, su escalamiento y mejora continua, desarrollo de cadena de proveeduría, escalamiento de tecnología y escalamiento de la producción. Regulación y control de calidad en procesos productivos de baterías. Supervisión de escenarios de producción, orientación a resultados, gestión de proyectos, excelente comunicación, eficiente administración del tiempo, habilidades de negociación y comunicación, cualidades de liderazgo, alta capacidad de análisis y síntesis
Especialidad-Maestría-Doctorado	· Electroquímica · Química · Ciencia de Materiales	Investigación, innovación, desarrollo, pruebas de concepto y sólidos conocimientos en baterías de ion de litio BIL, electroquímica avanzada, ciencias y química de materiales Capacidades académicas de excelencia, autodidacta, capacidad desarrollo de investigación de alto impacto, comunicación efectiva, trabajo en equipo, resolución de problemas

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Perfiles académicos para la etapa de fabricación de módulos y paquetes

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES RELACIONADOS
Perfil técnico	• Técnicos en procesos productivos • Técnicos en procesos industriales • Técnicos en electrónica • Técnicos en mecánica • Técnicos en electromecánica	En baterías de ion litio BIL, electrónica de potencia, sistema de manejo de baterías, técnicas de soldadura y electrónica, implementación de *software*, procesos de producción, su escalamiento y mejora continua Técnicas electroquímicas de caracterización de baterías, módulos, *packs* y sus requisitos de seguridad
Perfil profesional-licenciatura o Ingeniería	• Ingeniería en procesos productivos • Ingeniería en procesos industriales • Ingeniería en electrónica • Ingeniería eléctrica • Ingeniería mecánica • Ingeniería en electromecánica • Ingeniería química • Ingeniería en sistemas automotrices (electromovilidad) • Ingeniería de software • Licenciatura en informática	Sólidos conocimientos en baterías de ion litio BIL, electroquímica avanzada, electrónica, electrónica de potencia, procesos de producción automatizados, su escalamiento y mejora continua, desarrollo de cadena de proveeduría, escalamiento de tecnología y escalamiento de la producción. Regulación y control de calidad en procesos productivos paquetes y módulos de baterías Supervisión de escenarios de producción, gestión de proyectos, habilidades de comunicación, alta capacidad de análisis y síntesis

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Perfiles académicos para la etapa de aplicaciones e implementación

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES RELACIONADOS
Perfil técnico	• Técnicos industriales • Técnicos en electrónica • Técnicos en mecánica • Técnicos en electromecánica • Técnicos en electricidad • Técnicos en mecatrónica • Técnicos en Electromovilidad	En baterías de ion litio BIL, electrónica de potencia, sistema de manejo de baterías, técnicas de soldadura y electrónica, implementación de *software*, procesos de producción, su escalamiento y mejora continua Técnicas electroquímicas de caracterización de baterías, módulos, paquetes y sus requisitos de seguridad
	• Ingeniería industrial • Ingeniería en electrónica • Ingeniería eléctrica • Ingeniería mecánica • Ingeniería en electromecánica • Ingeniería en sistemas automotrices • Ingeniería de software • Robótica industrial • Ingeniería en Electromovilidad	Sólidos conocimientos en baterías de ion litio BIL, sistemas de almacenamiento de energía, electromovilidad, micro movilidad, energía sustentable, electrolineras, centros de carga, infraestructura sustentable, urbanismo, electrónica avanzada, pruebas de baterías de alta capacidad, técnicas electroquímicas, condiciones de operación, protocolos de degradación, electrónica de potencia avanzada, procesos de producción, su escalamiento, desarrollo de cadena de proveeduría, escalamiento de tecnología y escalamiento de la producción. Tren motriz, sistema de manejo de baterías. Aplicaciones de control e inteligencia artificial en vehículos Supervisión y gestión de proyectos, habilidades de comunicación, alta capacidad de análisis y síntesis, manejo de personal, innovación, creatividad, pensamiento convergente, pensamiento divergente

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Perfiles académicos para la etapa de aplicaciones de segunda vida y reciclaje

TALENTO ESPECIALIZADO	CARRERA	CONOCIMIENTOS Y HABILIDADES RELACIONADOS
Perfil técnico	• Técnicos laboratoristas químicos • Técnicos industriales • Técnicos en electrónica • Técnicos en mecánica • Técnicos en electromecánica • Técnicos en mecatrónica	En baterías de ion litio BIL, fundamentos de electroquímica, ciencias y química de materiales, operaciones unitarias (mezclado, decantado, evaporación, secado, etc.), procesos de producción, su escalamiento y mejora continua. Técnicas electroquímicas de caracterización nivel celda, módulos, paquetes y sus requisitos de seguridad. Manipulación de equipo especializado
Perfil profesional-licenciatura o Ingeniería	• Ingeniería industrial • Ingeniería en electrónica • Ingeniería eléctrica • Ingeniería mecánica • Ingeniería en electromecánica • Ingeniería química • Licenciatura en química industrial	Sólidos conocimientos en baterías de ion litio BIL, electroquímica avanzada, ciencias y química de materiales, operaciones unitarias, segundo uso de baterías de vehículos en otras aplicaciones. Segundo uso de baterías de aplicaciones estacionarias. Reciclaje, recuperación y aprovechamiento de litio y otros materiales en baterías gastadas. Procesos de producción, su escalamiento y mejora continua, desarrollo de cadena de proveeduría, escalamiento de tecnología y escalamiento de la producción. Regulación y control de calidad en procesos productivos de baterías. Supervisión y gestión de proyectos, habilidades de comunicación, alta capacidad de análisis y síntesis, manejo de personal, innovación, creatividad, pensamiento convergente, pensamiento divergente

Fuente: elaboración propia.

Además de los perfiles específicos para cada etapa de la cadena de valor de las BIL, se requieren perfiles transversales para complementar las actividades principales planteadas. Estos últimos están asociados a la gestión del negocio y se presentan en el capítulo 1.

ESPECIALIDADES PARA FORTALECER LOS PERFILES DE TALENTO ESPECIALIZADO

El desarrollo de baterías ion litio es un campo especializado que requiere la colaboración de expertos con una base ingenieril y científica y cuenten con los perfiles mencionados, pero se requieren fortalezas que sólo pueden alcanzar cursos específicos.

A continuación, se presentan propuestas de especialidades que deben ser consideradas en las ingenierías como materias o ser parte de programas de posgrado.

1. *Química de materiales.* Es fundamental tener conocimientos profundos en química de materiales para entender la composición y el comportamiento de los diferentes componentes de las baterías, como los electrodos, los electrolitos y los materiales de la interfaz. Además de poder seleccionar y diseñar materiales con propiedades adecuadas para aplicarlo en BIL.
2. *Ingeniería de procesos.* Para diseñar y optimizar los procesos de fabricación de los componentes de las baterías, así como para asegurar la calidad y eficiencia de los procesos químicos involucrados.
3. *Electrónica avanzada.* Para comprender y diseñar sistemas de gestión de baterías (BMS, por sus siglas en inglés) y sistemas de control que optimicen el rendimiento y la vida útil de las baterías.
4. *Física y electroquímica avanzada.* La comprensión de los principios físicos que rigen el comportamiento de los materiales, la transferencia de carga y otros fenómenos relacionados con las baterías es esencial.
5. *Procesos térmicos.* Dado que las baterías de ion litio pueden generar calor durante su funcionamiento, conocimientos en ingeniería térmica son necesarios para diseñar sistemas de gestión que eviten el sobrecalentamiento y aseguren los dispositivos.

6. *Diseño mecánico*. Para diseñar la estructura física de las baterías, asegurando la integridad y la seguridad estructural.
7. *Normativas y seguridad*. Para tener conocimientos en regulaciones y normativas de seguridad y garantizar que las baterías cumplan con estándares y regulaciones internacionales.
8. *Matemáticas y modelado computacional*. Para realizar simulaciones y modelados que ayuden a comprender y prever el comportamiento de las baterías en diversas condiciones.

CONSIDERACIONES FINALES

El desarrollo de baterías de ion litio en México enfrenta desafíos complejos que requieren perfiles y especialidades específicas. El país cuenta con programas educativos en varios niveles que pueden formar estos perfiles, así como instituciones capaces de impartir las especialidades necesarias. No se necesitan nuevos programas, sino un enfoque en temas relevantes para la cadena de valor de las baterías en cada nivel académico.

La cadena de valor de las baterías es crucial para el desarrollo socioeconómico y sustentable de México, con aplicaciones en movilidad eléctrica y almacenamiento estacionario. Los compuestos de litio, especialmente el fosfato de litio y hierro (LFP), son esenciales para la fabricación de baterías y la soberanía tecnológica del país. Proyectos como plantas piloto son vitales para perfeccionar las etapas de fabricación y para la economía circular, que incluye la reutilización y reciclaje de baterías usadas. Es necesario fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas nacionales en estos aspectos.

México tiene fuertes capacidades en investigación, desarrollo tecnológico e innovación que pueden acelerar el avance en tecnología de baterías de ion litio. La estrategia nacional busca la soberanía tecnológica en el sector energético, abarcando desde la industrialización del litio hasta su uso en electromovilidad y otros sectores clave. Es crucial prepararse para los cambios en la industria, que dependen del acceso a recursos minerales, la evolución de las químicas de las baterías y el desarrollo de tecnologías

alternativas. Aunque estas nuevas tecnologías aún no compiten plenamente con las baterías de ion litio en términos de producción, costos, infraestructura y seguridad, su desarrollo eventual podría afectar el mercado.

REFERENCIAS

Abraham, K.M. (2020). How comparable are sodium-ion batteries to lithium-ion counterparts? *ACS Energy Letters, 5*(11), 3544. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02181

Abu, S.M., Hannan, M.A., Hossain Lipu, M.S., Mannan, M., Ker, P.J., Hossain, M.J. y Mahlia, T.M.I. (2023). State of the art of lithium-ion battery material potentials: An analytical evaluations, issues and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, *394*, 136246. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136246

Akhmetov, N., Manakhov, A., Al-Qasim, A.S. (2023) Li-ion battery cathode recycling: An emerging response to growing metal demand and accumulating battery waste. *Electronics* 12(5), 1152. https://doi.org/10.3390/electronics12051152

Amici, J., Asinari, P., Ayerbe, E., Barboux, P., Bayle-Guillemaud, P., Behm, R.J., Berecibar, M., Berg, E., Bhowmik, A., Bodoardo, S., Castelli, I.E., Cekic-Laskovic, I., Christensen, R., Clark, S., Diehm, R., Dominko, R., Fichtner, M., Franco, A.A., Grimaud y A., Guillet, et al. (2022). A roadmap for transforming research to invent the batteries of the future designed within the european large scale research initiative battery 2030+. *Advanced Energy Materials*, *12*(17), 2102785. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aenm.202102785

Battery2030 (2023). *The roadmap-battery 2030+*. https://battery2030.eu/research/roadmap/

Buechel, C., Bednarski, L. y Wietlisbach, S. (2021). *As lithium-ion battery materials evolve, suppliers face new challenges*. https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/research-analysis/lithiumion-battery-materials-evolve-suppliers-face-new-challenges.html

Chabot, B. (2016). *New battery tech takes charge*. https://www.motor.com/magazine-summary/new-battery-tech-takes-charge/

Energy5 (2024). *Coches eléctricos en zonas urbanas: Ventajas y desventajas*. https://energy5.com/es/coches-electricos-en-zonas-urbanas-ventajas-y-desventajas.

Fiorentini, V., Farris, R., Argiolas E. y Maccioni, M.B. (2019). High thermoelectric figure of merit and thermopower in layered perovskite oxides. *Physical Review Materials*, *3*(2), 022401. https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.022401

Grandviewresearch (2021). *Lithium-ion battery market size & trends*. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lithium-ion-battery-market

Granholm, J.M. (2021). *Executive summary national blueprint for lithium batteries*. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/FCAB%20National%20Blueprint%20Lithium%20Batteries%200621_0.pdf

Hioki (2023). *Proceso de producción de baterías de iones de litio*. https://www.hioki.com/us-es/industries-solutions/manufacturing/liion-production-testing.html

Hitchin, J.R. (2022). The scale up of chemical reactions. *Nature Reviews Methods Primers*, *2*(1), 28. https://doi.org/10.1038/s43586-022-00116-8

Indicador Automotriz (2023). *Las entregas de última milla deberán adaptarse a una nueva realidad*. https://www.indicadorautomotriz.com.mx/tendencias/las-entregas-de-ultima-milla-deberan-adaptarse-a-una-nueva-realidad/

Jimenez, D., (2023). *Recycling and its effects on the li industry*. Sudamerica iLi Markets.

Jones, B., Acuña, F. y Rodríguez, V. (2021). *Cadena de valor del litio: Análisis de la cadena global de valor de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Jugović, D. y Uskoković, D. (2009). A review of recent developments in the synthesis procedures of lithium iron phosphate powders. *Journal of Power Sources*, *190*(2), 538. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.01.074

Julien, C., Mauger, A., Vijh, A. y Zaghib, K. (2016). *Lithuim batteries: Science and technology*. Springer International Publishing AG.

Kamalika Ghatak, Hemant Kumar, Siva Nadimpalli y Datta, D. (2017). *Effect of decreasing cobalt content on the electrochemical properties and*

structural stability of Li_(1-x)Ni_(y)Co_(z)Al_(0.05)O_(2) Type Cathode Materials. Materials Science-Cornell University,

Liang, Y., Zhao, C.-Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J.-Q., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M.-M., Chueh, Y.-L., Yu, H. y Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat 1*(1), 6. https://doi.org/10.1002/inf2.12000

Liu, X., Sun, L., Hung Vu, N., Thi Hai Linh, D., Thi Dien, P., Thi Hoa, L., Thi Lien, D., Xuan Nang, H., Dao, V.D. (2023). Synthesis of lifepo4/carbon/graphene for high-performance li-ion battery. *Journal of Electroanalytical Chemistry. 932*, 117205. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117205

Liu, Y., Zhang, R., Wang, J. y Wang, Y. (2021). Current and future lithium-ion battery manufacturing. *iScience, 24*(4), 102332. https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102332

Mtixtl (2023). *8 channel battery & super capacitor analyzer (5v 40a) with internal resistance testing - bst8-5v40a-rt*. https://www.mtixtl.com/Computerized8ChannelsBatteryAnalyzer5V40-BST8-5V40A-RT.aspx

Munguía, S.F. (2020). *Camiones eléctricos: Así son los planes de los principales fabricantes ante el reto de electrificar el transporte de mercancías por carretera*. https://www.xataka.com/automovil/camiones-electricos-asi-planes-principales-fabricantes-reto-electrificar-transporte-mercancias-carretera

Pachuta, K.G., Pentzer, E.B. y Sehirlioglu, A. (2019). Cation deficiency associated with the chemical exfoliation of lithium cobalt oxide. *Journal of the American Ceramic Society, 102*(9), 5603. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jace.16382

Pasquali, M. (2022). *México, líder en ventas de autos eléctricos en américa latina*. https://es.statista.com/grafico/26906/volumen-de-ventas-de-vehiculos-electricos-en-latinoamerica/.

Poworks-Lithium (2023). *Lithium carbonate (battery grade)*. https://poworks.com/products

Scania-México (2022). *Scania México presenta su primer camión 100 % eléctrico*. https://www.scania.com/mx/es/home/about-scania/newsroom/

news/2022/-scania-mexico-presenta-su-primer-camion-100--electrico-.html

Sohu (2020) *What is the inside story of tesla's own batteries?* https://www.sohu.com/a/377491065_448326

Suarez-Hernandez, R., Ramos-Sánchez, G., González, I. (2023). Hierarchical implementation of electrochemical techniques to provide a reliable diagnosis of commercial lithium-ion pouch cells under selected operational conditions. *Journal of Energy Storage, 73*. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109120

Suárez, L.M. (2017). *Entre mi casa y mi destino: Movilidad y transporte en México.* https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2017_384.html.

Suryatna, A., Raya, I., Thangavelu, L., Alhachami, F.R., Kadhim, M.M., Altimari, U.S., Mahmoud, Z.H., Mustafa, Y.F., Kianfar, E. y Liu, X., (2022). A review of high-energy density lithium-air battery technology: Investigating the effect of oxides and nanocatalysts. *Journal of Chemistry*, 2022, 1. https://doi.org/10.1155/2022/2762647

Suttison, S., Pengpat, K., Intatha, U., Fan, J., Zhang, W. y Eitssayeam, S., (2022). Preparation of lfp-based cathode materials for lithium-ion battery applications: *Materials Today. Proceedings 65*(4), 2347-2350. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.302

Tapia, C.P. (2022). *Daimler truck México quiere conquistar la electromovilidad y este es su plan*. https://www.forbes.com.mx/daimler-truck-mexico-quiere-conquistar-la-electromovilidad-y-este-es-su-plan/

Yu, M. (2020). *Lithium carbonate or lithium hydroxide? Who is the first choice for ternary cathode materials?* http://news.cnpowder.com.cn/55202.html

Zhu, Y., Huang, Y., Du, R., Tang, M., Wang, B. y Zhang, J. (2021). Effect of ni2+ on lithium-ion diffusion in layered lini1−x−ymnxcoyo2 materials. *Crystals*, *11*(5), 465

5. Tecnologías alternativas de almacenamiento de energía TAAE

RESUMEN Y MAPA DE RUTA

La disponibilidad intermitente de energía obtenida de recursos renovables, tales como las energías eólica y fotovoltaica, presenta un reto mayor para su despliegue masivo e integración a la red eléctrica nacional (Montaudon, 2023). Actualmente, México cuenta con una amplia comunidad científica y tecnológica que trabaja de manera activa en el desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento de energía con el fin de lograr llevar al mercado dispositivos que permitan el aprovechamiento de energía renovable las 24 horas del día.

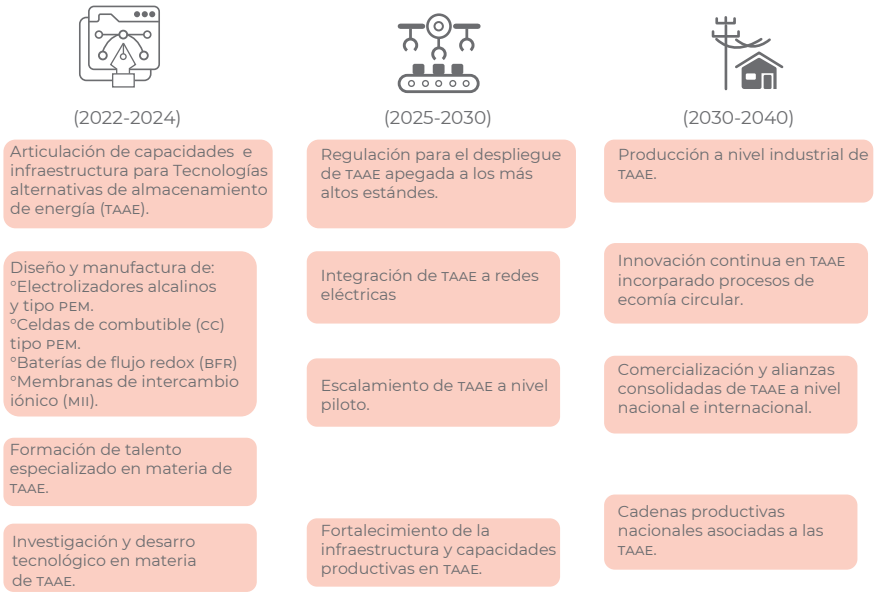
Los sistemas de almacenamiento de energía acoplados a redes y micro-redes eléctricas, tienen aplicaciones en el aumento de la calidad de la energía, el aumento, la confiabilidad del suministro y la reducción de costos de electrificación rural (Rana et al., 2023); avanzar en la asimilación y desarrollo de sistemas de almacenamiento que permitan la gradual descarbonización del sistema eléctrico nacional, así como lograr la electrificación del 100% de las comunidades rurales, traerá a México grandes beneficios de desarrollo económico y de bienestar social.

Para consolidar el entorno nacional de gestión energética y fortalecer a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y al sector social mediante dispositivos de almacenamiento de energía, se han identificado

las tecnologías nacionales a nivel óptimo para el desarrollo de dispositivos capaces de operar en condiciones reales y cuyo escalamiento pueda acelerarse. El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) trabaja en coordinación con centros de investigación e instituciones de educación superior para la elaboración de proyectos multiinstitucionales alineados con la agenda nacional en materia de sustentabilidad.

MAPA DE RUTA

Figura 1. Mapa de ruta para las tecnologías alternativas de almacenamiento de energía (TAAE) para el periodo 2022-2040



Nota: Iconos realizados por pixel perfect de www.flaticon.com
Fuente: elaboración propia.

El presente capítulo tiene la siguiente estructura: en primer lugar, se proporciona una introducción a los sistemas de almacenamiento de

energía utilizados en los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. A continuación, se detallan algunas tecnologías específicas que han alcanzado un nivel tecnológico adecuado, justificando su priorización en el desarrollo mexicano según el mapa de ruta presentado en la figura 1. Por último, se presentan las conclusiones que resumen los aspectos clave abordados en este capítulo.

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como de aumentar la presencia de fuentes renovables en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), es imperativo impulsar la integración de sistemas de almacenamiento de energía que mantengan la continuidad, confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico. De acuerdo con el resumen ejecutivo para tomadores de decisiones del informe del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

> Las tecnologías de almacenamiento de energía pueden respaldar los objetivos de seguridad energética y cambio climático proporcionando valiosos servicios tales como: mejora de la eficiencia en el uso de recursos del sistema energético; integración de niveles más altos de recursos renovables variables y electrificación del sector de uso final; apoyar una mayor producción de energía donde se consume; aumentar el acceso a la energía; y mejorar la estabilidad, flexibilidad, confiabilidad y resiliencia de la red eléctrica. Además, pueden proporcionar productos asociados y servicios relacionados que pueden contribuir a los componentes de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad de la red a la que están conectados (INECC, 2020).

Cuando se argumenta en contra de aprovechar plenamente las energías renovables en México, cuya amplia disponibilidad y distribución son

reconocidas, a menudo se destaca la complejidad de integrarlas en la red eléctrica. Esto puede atribuirse a la naturaleza variable de estas fuentes de energía, a la insuficiente capacidad en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) o incluso a la falta de demanda en momentos de alta disponibilidad. En esas circunstancias, los sistemas de almacenamiento energético pueden jugar un papel fundamental. Estos sistemas representan una opción para proporcionar la flexibilidad necesaria dentro del sistema eléctrico y fomentar la reducción del consumo de combustibles fósiles en el sector energético mexicano. Asimismo, son clave para facilitar el proceso de transición y avanzar hacia la autosuficiencia energética, trascendiendo la dependencia de los combustibles fósiles.

Las tecnologías actuales de almacenamiento de energía pueden clasificarse en los siguientes tipos: mecánico, electroquímico, eléctrico, químico y térmico (tabla 1). Estas tecnologías de almacenamiento se encuentran en diversos niveles de desarrollo, abarcando desde las fases iniciales de investigación hasta tecnologías maduras plenamente implementadas (Armiño, 2019).

Tabla 1. Tipos de almacenamiento de energía

MECÁNICO	ELECTROQUÍMICO	ELÉCTRICO
Hidrobombeo - PHS	Baterías secundarias o recargables	Supercondensadores
Aire comprimido - CAES	Plomo-Acido, NiCd, NiMH, Li-ion, NaS	
Volante de inercia - FES	Baterías de flujo	Superconductores
	Vanadio, comp. orgánicos, otros	SMES
	QUÍMICO	**TÉRMICO**
	Hidrógeno	Calor sensible
	Amoniaco	Calor latente
	Combustibles sintéticos	Procesos termoquímicos

Fuente: elaboración propia a partir de Armiño (2019).

APLICACIONES POTENCIALES DE LAS TAAE

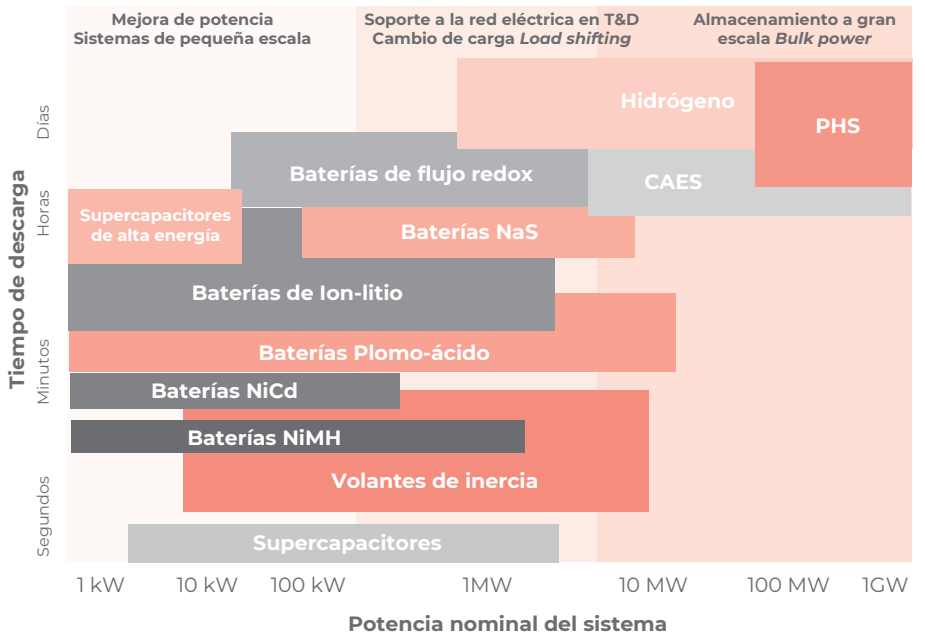
Las posibles aplicaciones de las TAAE están estrechamente vinculadas a su capacidad de almacenamiento y potencia (figura 2). Cada tipo de TAAE exhibe ventajas y desventajas que se relacionan con factores como la capacidad de almacenamiento, el tiempo de respuesta, la vida útil, el ciclo de vida, la eficiencia, el costo, la potencia, la densidad de energía y el nivel de madurez.

Estas ventajas y desventajas se traducen en las diferentes aplicaciones de las TAAE en los sistemas eléctricos. Por ejemplo, para controlar los niveles de voltaje y frecuencia que mejoren la calidad de la energía eléctrica entregada a los usuarios finales, se requieren tiempos de descarga del orden de segundos, las baterías de níquel, algunos supercapacitores y los volantes de inercia son ideales.

Para tiempos de descarga de horas de duración, los supercapacitores de alta energía son, hasta ahora, una mejor opción (Yadlapalli et al., 2022; Torki et al., 2023). En aplicaciones de administración de costos del consumo eléctrico y de mantenimiento de la estabilidad de las redes de transmisión y distribución, las baterías de flujo, los volantes de inercia y los supercapacitores de alta potencia son alternativas que compiten con algunos tipos de baterías convencionales (Massucco et al., 2021).

Para el almacenamiento a gran escala en la generación de electricidad y para atender fluctuaciones de alta energía y potencia, las tecnologías de hidrógeno, aire comprimido y rebombeo de agua son alternativas competitivas (EASE-Storage, 2013). Un aspecto crucial a tener en cuenta es que diversas tecnologías de almacenamiento emergentes se perfilan como opciones ambientalmente favorables en comparación con algunas baterías convencionales, como las de plomo-ácido y Ni-Cd. Estas últimas pueden generar impactos ambientales no deseados a lo largo de su ciclo de vida (Guney y Tepe, 2017; INECC, 2020).

Figura 2. Tecnologías de almacenamiento de energía



Fuente: elaboración propia a partir de EASE (2013).

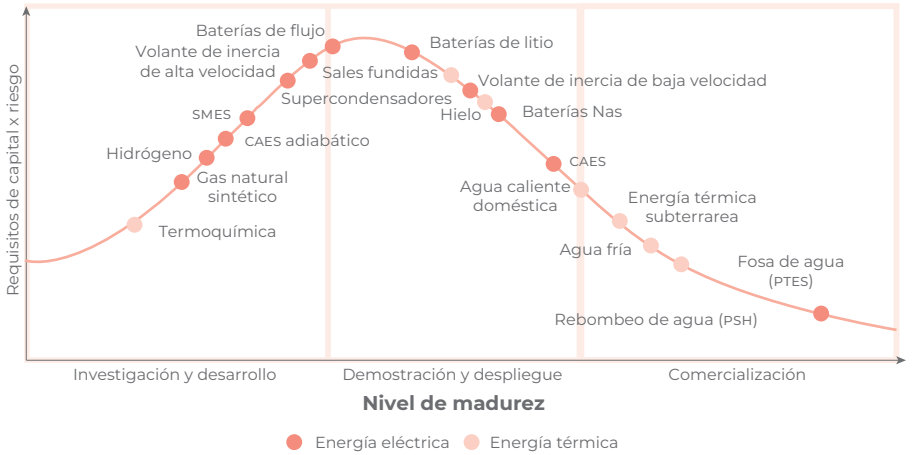
INVERSIÓN INICIAL, RIESGO TECNOLÓGICO Y NIVEL DE MADUREZ DE LAS TAAE

Dentro de las tecnologías clave de almacenamiento de energía, evaluadas según sus necesidades de inversión inicial, riesgo tecnológico y nivel de madurez, se pueden identificar tres categorías: *1*) investigación y desarrollo, *2*) demostración y despliegue, y *3*) fases de comercialización (figura 3).

La tecnología de baterías con base en litio actualmente se halla en la fase de despliegue con índice de riesgo significativo. En cambio, la tecnología de sales fundidas se encuentra también en su fase de despliegue, pero con un riesgo de inversión más moderado. Es relevante señalar que

la tecnología de almacenamiento termoquímico, a pesar de presentar un bajo riesgo de inversión, aún se encuentra en la etapa de investigación, mientras que la tecnología de almacenamiento por bombeo hidráulico se sitúa en la fase comercial con un riesgo de inversión más reducido (DeCourt, 2013; Paksoy, 2013).

Figura 3. Estado de algunas tecnologías de almacenamiento en función de sus requerimientos de inversión inicial y su nivel de madurez



Fuente: elaboración propia a partir de Decourt y Paksoy (2013).

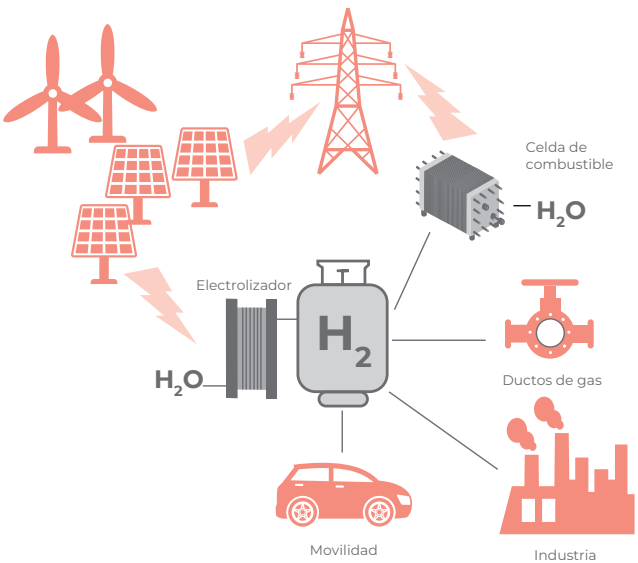
HIDRÓGENO, ELECTROLIZADORES Y CELDAS DE COMBUSTIBLE

El hidrógeno es el elemento más ligero y abundante del universo. La molécula de hidrógeno (H_2) es una sustancia combustible que al combinarse con oxígeno (quemarse) produce calor y agua. En la naturaleza difícilmente se encuentra de forma libre, por lo que para obtenerlo se debe producir a través de procesos químicos o electroquímicos. Se trata de una sustancia indispensable en la refinación del petróleo, la producción de vidrio

plano, la síntesis de fertilizantes, la hidrogenación de aceites vegetales y la producción de diversas sustancias químicas. Actualmente el método principal de producción de H_2 es la reformación de gas natural.

El hidrógeno ha ganado popularidad como sustancia portadora de energía, ya que puede producirse mediante la electrólisis del agua utilizando energía renovable, lo que permite crear un ciclo sustentable de producción-consumo de este combustible. Así, en horas donde la energía eléctrica generada excede la demanda, se puede producir hidrógeno para almacenarlo y utilizarlo en las noches (cuando no hay generación fotovoltaica) en momentos o temporadas sin viento para el funcionamiento de aerogeneradores, o durante picos de demanda de la red eléctrica. Por otro lado, al no generarse emisiones durante la extracción de la energía contenida en el H_2, también se ha impulsado su uso como combustible para diversos vehículos urbanos e industriales (Sikiru et al., 2024).

Figura 4. Esquema de un sistema de almacenamiento de energía basado en hidrógeno



Fuente: adaptado de Hinicio (2022) y Odériz Martínez (2020).

A pesar de sus ventajas, persisten desafíos técnicos y económicos que han obstaculizado la implementación de sistemas de H_2 a gran escala. Sin embargo, los avances en tecnologías para su producción y almacenamiento (figura 4), (Martínez, 2020; Hinicio, 2022) como en los sistemas generación de energía eléctrica a partir de H_2, perfilan a este combustible como una prometedora alternativa para el almacenamiento de energía limpia y renovable.

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE H_2

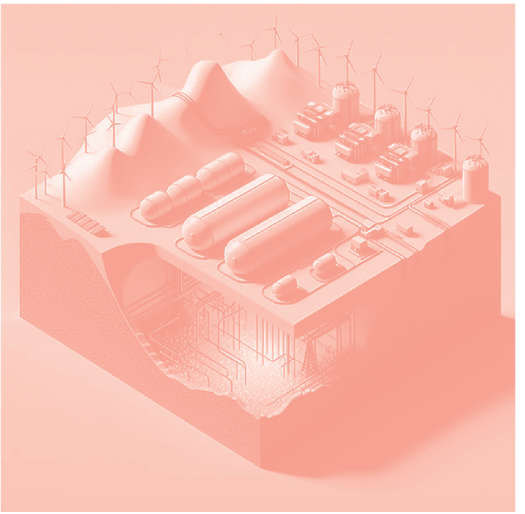
Un sistema de almacenamiento de energía basado en hidrógeno diseñado para dar soporte a los sistemas de generación, transmisión y distribución de una red eléctrica se conforma por cuatro subsistemas principales: *1*) producción por electrólisis, *2*) almacenamiento, *3*) transporte, y *4*) re-electrificación.

Los sistemas de producción de hidrógeno mediante electrólisis emplean energía eléctrica para descomponer la molécula de agua (H_2O) en oxígeno (O_2) e hidrógeno. Este proceso se realiza mediante dispositivos denominados "electrolizadores". El hidrógeno puede almacenarse físicamente ya sea como gas o como líquido. El almacenamiento de hidrógeno como gas generalmente requiere tanques de alta presión (presión del tanque de 350-700 bares) (figura 5). El almacenamiento de hidrógeno como líquido necesita temperaturas criogénicas, ya que el punto de ebullición del hidrógeno a la presión atmosférica es de −252.8 °C. Además, el hidrógeno puede ser almacenado en las superficies de sólidos (por adsorción) o dentro de sólidos (por absorción). También es posible almacenar H_2 en formaciones geológicas subterráneas como cavernas salinas, yacimientos de gas y crudo agotadas, acuíferos y cavernas de rocas duras.

El transporte y distribución de H_2 se puede llevar a cabo mediante ductos para distancias entre 100 y 3000 km, autotanques para distancias menores a 1000 km y barcos para distancias mayores a 3000 km. La re-electrificación se refiere a la producción de energía eléctrica a partir

de hidrógeno, para lo cual se pueden utilizar turbinas o dispositivos conocidos como “celdas de combustible”.

Figura 5. Ilustración de un sistema de generación, almacenamiento y transporte de hidrógeno.

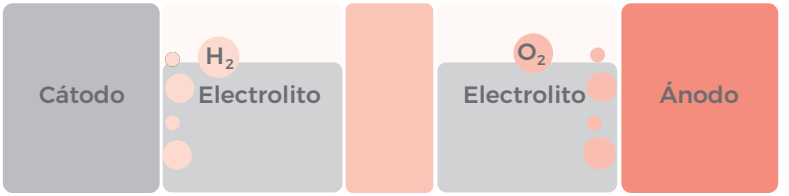


Fuente: elaboración propia con base en Open AI (2024).

ELECTROLIZADORES

Los electrolizadores son dispositivos que, mediante una corriente eléctrica, descomponen el agua en moléculas gaseosas de hidrógeno y oxígeno (figura 6). Un electrolizador está formado por celdas electroquímicas conectadas en serie, cada una con un ánodo, un cátodo y un electrolito. En los electrodos (ánodo y cátodo), las moléculas de agua se someten a reacciones electroquímicas generando hidrógeno y oxígeno, mientras que el electrolito permite el transporte de carga eléctrica (mediante iones) entre los electrodos. Los electrolizadores cuentan con sistemas periféricos para la alimentación de agua y para el control y monitoreo de temperatura, corriente y voltaje de operación.

Figura 6. Diagrama básico de un electrolizador



NOTA: Actualmente existen cuatro tipos principales de electrolizadores (tabla 2), cada uno con distintos grados de madurez: *1*) electrolizadores de electrolito alcalino (electrólisis alcalina); *2*) electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM), *3*) electrolizadores de óxido sólido; *4*) electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEM).
Fuente: elaborado por Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) (2023).

Tabla 2. Principales tecnologías de electrólisis

	ELECTROLIZADORES DE ELECTROLITO ALCALINO	ELECTROLIZADORES PEM	ELECTROLIZADORES AEM	ELECTROLIZADORES DE ÓXIDO SÓLIDO
Nivel de desarrollo	Comercial	Comercial	Nivel laboratorio	Pilotos industriales < 100 MW
Electrolito	Solución de hidróxido de potasio (KOH)	Membranas poliméricas conductoras de cationes	Membranas poliméricas conductoras de aniones	Cerámicas de itrio y zirconio
Temperatura	60 a 80 °C	50 a 80 °C	50 a 60 °C	500 a 850 °C
Presión (BAR)	< 30	< 70	< 30	< 25
Durabilidad (horas)	100000	60000	Por determinar	10000
Consumo energético (kWh/m^3)	4.5 a 7	4.5 a 7.5	4.8	2.5 a 3.5
Costo (USD/kW)	500 a 1400	1100 a 1800	Por determinar	2800 a 5600
Ventajas	Compactas. Arranque y respuesta rápida. H_2 de alta pureza	Menor costo. Tecnología madura. Sin necesidad de metales preciosos	Compactas. Arranque y respuesta rápida. H_2 de alta pureza. Sin necesidad de metales preciosos	Se puede usar como celda reversible (celda de combustible-electrolizador) Alta eficiencia. Sin necesidad de metales preciosos

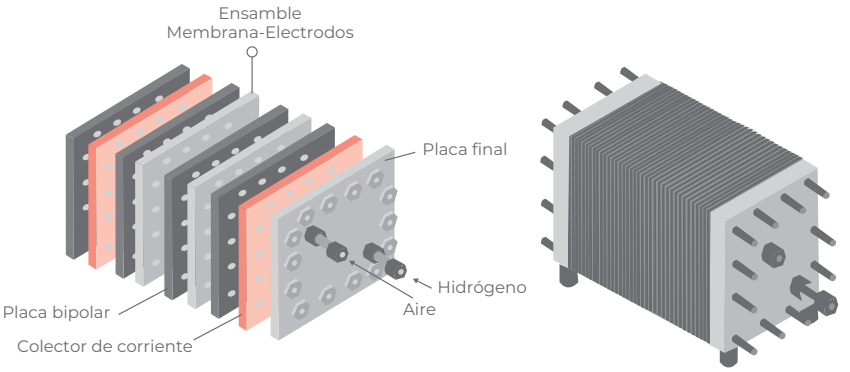
Fuente: elaboración propia a partir de (Miller et al., 2020; Nasser et al., 2022; IEA, 2023).

CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible son sistemas electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno en electricidad de manera limpia, silenciosa y eficiente. Dentro de las celdas el hidrógeno se combina con el oxígeno del aire para formar agua, energía eléctrica y calor. Al no contar con partes móviles, las celdas de combustible operan de forma silenciosa, son compactas y confiables, la figura 7 muestra las partes que la conforman. Su eficiencia de conversión de energía depende de varios factores, pero se suelen operar a eficiencias de entre el 40 y el 60% (Wang et al., 2020).

Al igual que los electrolizadores, las celdas de combustible están formadas por celdas electroquímicas conectadas en serie, cada una con un ánodo, un cátodo y un electrolito. En los ánodos el hidrógeno es oxidado, mientras que en los cátodos el oxígeno es reducido; el electrolito permite el transporte de carga eléctrica entre los electrodos. Para lograr una alimentación constante de hidrógeno y aire a una celda de combustible, se requieren de componentes periféricos que, además, permiten controlar los parámetros de operación como corriente, voltaje, temperatura y presión.

Figura 7. Celdas de combustible. *a*) Partes de una celda de combustible y *b*) conjunto de celdas de combustible tipo PEM



Fuente: elaborado por INEEL (2023).

Existen diferentes tipos de celdas de combustible cuya diferencia principal es el tipo de electrolito que utilizan. También se pueden clasificar en función de su temperatura de operación; en el rango de alta temperatura (>500°C), se encuentran las celdas de carbonatos fundidos (MCFC) y las celdas de óxidos sólidos (SOFC); En el rango intermedio (>100°C), están las celdas de ácido fosfórico (PAFC) y las celdas de combustible alcalinas (AFC); Finalmente en el rango de baja temperatura (<100°C), están las celdas de metanol directo (DMFC) y las celdas de combustible tipo PEM (PEMFC) (tabla 3).

Tabla 3. Principales tipos de celdas de combustible

COMPONENTE	CELDAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM (PEMFC)	CELDAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC)	CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)	CELDAS DE COMBUSTIBLE DE METANOL DIRECTO (DMFC)	CELDAS DE COMBUSTIBLE DE CARBONATOS FUNDIDOS (MCFC)	CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)
Catalizador	Platino	Platino o níquel	Platino	Platino y rutenio	Níquel	Níquel
Combustible	H_2	H_2	H_2	Metanol	H_2 y CO	H_2 y CO
Temperatura	60 a 85°C	20 a 100°C	180 °C	< 70°C	500 a 750°C	650 a 1100°C
Eficiencia	40 a 80%	50 a 75%	50%	20 a 40%	50%	55 a 60%
Rango de potencia	1 a 100 kW	1 a 100 kW	5 a 400 kW	1 a 100 kW	0.3 a 300 MW	0.1 a 2 MW

Fuente: elaboración propia a partir de (Mekhilef et al., 2012; Sharaf y Orhan, 2014; Sazali et al., 2020).

DESARROLLOS DE ELECTROLIZADORES Y CELDAS DE COMBUSTIBLE PEM EN MÉXICO

Los electrolizadores PEM son una tecnología que se adapta muy bien a los requisitos de sistema de almacenamiento para la red eléctrica, en especial por su capacidad de respuesta menor a un segundo a los cambios de potencia. Como otras tecnologías de electrólisis, son fácilmente escalables; además, producen un hidrógeno de alta pureza y a una

presión de 70 bares, una presión de operación superior a la de las otras tecnologías de electrólisis (Shiva Kumar y Himabindu, 2019). Las celdas de combustible PEM comparten las ventajas de escalabilidad y respuesta rápida de los electrolizadores PEM; también se trata de sistemas compactos (x kW/m^3).

Ambas tecnologías ya se encuentran en etapa comercial, aunque a un costo más elevado que las tecnologías convencionales de generación de hidrógeno y de energía eléctrica; sin embargo, existen nichos de aplicación donde ya se están utilizando, como en vehículos de pasajeros y de carga (Waseem et al., 2023) y estaciones de recarga de H_2 (Apostolou y Xydis, 2019) sistemas de almacenamiento en microrredes aisladas (Van et al., 2023) producción de amoniaco (Olabi et al., 2023) sistemas de respaldo de energía, entre otros (Zainal et al., 2024).

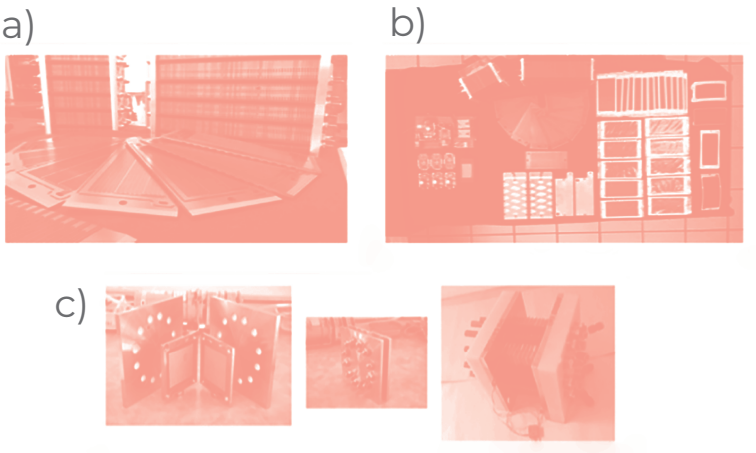
Tabla 4. Instituciones mexicanas con experiencia en el estudio y desarrollo de componentes de electrolizadores y celdas de combustible PEM.

COMPONENTE	INSTITUCIONES
Membranas de intercambio iónico	• Facultad de Química - UNAM • Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM • Instituto Tecnológico de Tijuana (ITT) • Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) • Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) • Centro de Innovación Aplicada en • Tecnologías Competitivas (Ciatec)
Catalizadores	• Universidad Autónoma de Zacatecas • Instituto Tecnológico de Tijuana (ITT) • Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) • Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (Cideteq)
Placas bipolares, difusores, electrodos y prototipos de diferentes escalas	• Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) • Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) • Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) • Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE)

Fuente: elaboración propia.

En México hay grupos de expertos que tienen la infraestructura y conocimiento para desarrollar componentes y sistemas de celdas de combustible y electrolizadores PEM. Por ejemplo, el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) ha desarrollado un electrolizador PEM prototipo de 130 Watts (CICY, 2021), mientras que en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) se tiene prototipos de hasta 2 kW, con capacidad para desarrollar equipos de hasta 20 kW (Flores Hernández y Cano Castillo, 2018). El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) ha trabajado con celdas de combustible PEM desde 1994 con varios prototipos desarrollados (Solorza-Feria et al., 1994). El INEEL cuenta con desarrollos propios de celdas de combustible PEM de hasta 3kW que han sido probados como sistema de propulsión de vehículos eléctricos (figura 8) (Zarco, 2023). En la tabla 4 se enlistan los componentes clave de los electrolizadores PEM y las instituciones con experiencia e infraestructura para su desarrollo.

Figura 8. Desarrollos de celdas de combustible (*a*, *b*) y electrolizadores (*c*) tipo PEM en el INEEL



Fuente: elaborado por INEEL (2024).

BATERÍAS DE FLUJO

Las baterías de flujo son dispositivos de almacenamiento de energía que utilizan sustancias químicas disueltas en solución para almacenar y liberar energía. A diferencia de las baterías convencionales, donde los componentes reactivos se almacenan dentro de la propia celda, en las baterías de flujo, estos compuestos están contenidos en tanques externos y fluyen a través de la celda cuando se necesita generar electricidad.

Una celda de estas baterías tiene dos electrodos, hechos de materiales porosos a base de carbono, separados por una membrana selectiva que permite el paso de iones, pero evita el contacto directo entre los electrodos. Cuando la batería está en funcionamiento, los iones en el electrolito fluyen a través de la membrana, generando una corriente eléctrica a medida que se producen reacciones redox en los electrodos.

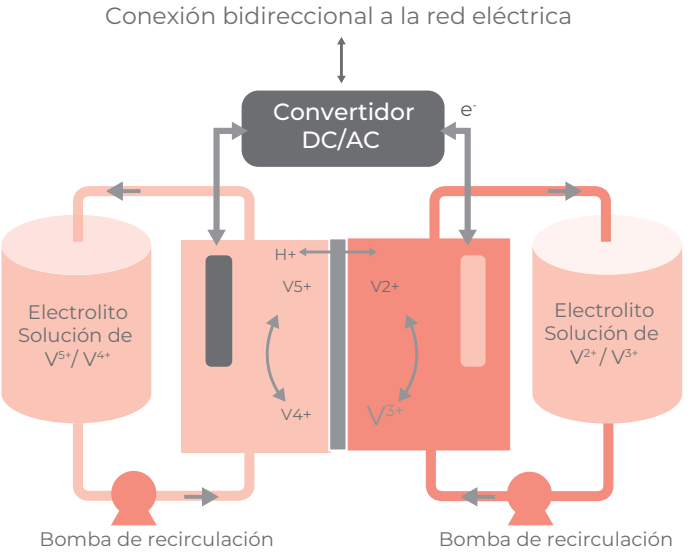
Las ventajas de las baterías de flujo incluyen su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía, su larga vida útil y la posibilidad de recargarlas fácilmente al reemplazar o recargar el electrolito. Esto las hace adecuadas para aplicaciones de almacenamiento de energía a gran escala, como en sistemas de energía renovable, donde se almacena la energía generada durante periodos de exceso para usarlo cuando la demanda es alta o la generación de energía es baja. Otras aplicaciones son el almacenamiento de energía para estabilizar la red eléctrica, por ejemplo, atender picos transitorios de demanda y paros de emergencia o de mantenimiento de termoeléctricas; también pueden ser fuente auxiliar de energía en caso de fallos en la red eléctrica para complejos comerciales, complejos habitacionales, edificios, ciudades pequeñas, etc.

Existen varios tipos de baterías de flujo, cada una con diferentes combinaciones de electrolitos y materiales para los electrodos. Algunos de los tipos más comunes son las baterías de flujo redox, las de flujo de compuestos orgánicos y las de flujo de electrodiálisis, que se describen en secciones posteriores.

BATERÍAS DE FLUJO REDOX

Las baterías de flujo redox, utilizan pares redox disueltos en los electrolitos para almacenar energía. Un par redox, también conocido como par de reducción-oxidación, es un concepto fundamental en la química que describe la transferencia de electrones entre dos especies químicas. En una reacción redox, una sustancia pierde electrones (se oxida) y otra sustancia gana esos electrones (se reduce). La palabra *redox* proviene de la combinación de los términos "reducción" y "oxidación". Algunos de los tipos se baterías de flujo redox más conocidos son:

Figura 9. Esquema de funcionamiento de una batería de flujo redox de vanadio



Fuente: elaboración propia.

1. *Baterías de vanadio*: Utilizan soluciones de vanadio en diferentes estados de oxidación (V^{2+}/V^{3+} o V^{4+}/V^{5+}) como electrolitos. Son conocidas por su estabilidad y larga vida útil (figura 9).

2. *Baterías de hierro-cromo*: Emplean electrolitos de hierro y cromo en estados de oxidación variables. Estás baterías son conocidas por su alta densidad de energía, pero pueden ser menos eficientes que otras opciones.
3. *Baterías de zinc-bromo*: Utilizan zinc y bromo como electrodos y bromuro de zinc como electrolito. Son adecuadas para aplicaciones de almacenamiento de energía a gran escala debido a su alta capacidad.

En la tabla 5. Se presentan algunas ventajas y desventajas de las baterías redox.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de algunas baterías redox

FAMILIA DE BATERÍA DE REDOX	VENTAJAS	DESVENTAJAS
De vanadio	Larga durabilidad (200 000 ciclos) Alta eficiencia energética (>80 %) Baja toxicidad	Baja densidad energética (15 a 25 Wh/L) Alto costo del vanadio (10 a 24 USD/kg)
De hierro	Menor costo que el vanadio	Problemas de reversibilidad de las reacciones. Reacciones secundarias Cruce de especies redox a través de la membrana. Toxicidad del cromo en el caso de baterías Fr-Cr
De zinc	Menor costo que el vanadio Estables y seguras	Baja densidad energética (60 a 80 Wh/kg). Riesgo de formación de dendritas en electrodos.
De litio	Alta densidad energética	Alta viscosidad del electrolito (suspensión de litio sólido). Retos de transporte de masa para mejorar eficiencia y aumentar densidad de corriente.

Fuente: elaboración propia a partir de Hou et al., 2024.

Las baterías de flujo redox aún se investigan y desarrollan en ámbitos académicos e industriales por su seguridad intrínseca y su diseño

modular. Sin embargo, en comparación con otras tecnologías, la relativamente baja densidad de energía, una menor eficiencia y el alto costo de inversión, han limitado su aplicación a gran escala. Aunque se han realizado esfuerzos enormes para mejorar el rendimiento y la rentabilidad de las baterías redox mediante diversas estrategias, sigue siendo un desafío lograr su uso generalizado como medio de almacenamiento de energía a gran escala (Khor et al., 2018; Vinco et al., 2021; Matteucci et al., 2023; Wang et al., 2023; Daniel et al., 2024; Fang et al., 2024).

BATERÍAS DE FLUJO DE ELECTRODIÁLISIS ÁCIDO-BASE

Las baterías de flujo de electrodiálisis ácido-base (BF-ED-AB) son dispositivos que permiten el almacenamiento de energía al transformar la energía eléctrica en energía química a través de la producción de una sustancia ácida y una sustancia cáustica a partir de una sal. Por ejemplo, una solución de cloruro de sodio o sal común (NaCl) es transformada de manera gradual en ácido clorhídrico (HCl) y sosa cáustica (NaOH); conforme la batería se carga, el HCl y la sosa se van concentrando, mientras la solución de sal se diluye. Cuando se produce energía eléctrica, el ácido y la sosa fluyen a través de la batería transformándose en agua y sal, con lo cual liberan la energía química almacenada. A lo largo de la descarga de las BF-ED-AB, el ácido clorhídrico y la sosa se diluyen mientras la solución de sal se va concentrando. Así, se puede concebir un sistema de almacenamiento de energía de circuito cerrado con tanques de soluciones de sal, soluciones de HCl y de NaOH, y una BF-ED-AB.

En las BF-ED-AB, la reacción que permite la formación de soluciones ácidas y cáusticas a partir de una solución de sal y viceversa, es la disociación del agua al interior de un componente fundamental de estas baterías: la membrana bipolar. Las membranas bipolares tienen una capa que permite únicamente el paso de cationes (iones positivos) y una segunda capa que permite el paso de aniones (iones negativos) e impide el paso de cationes (figura 10).

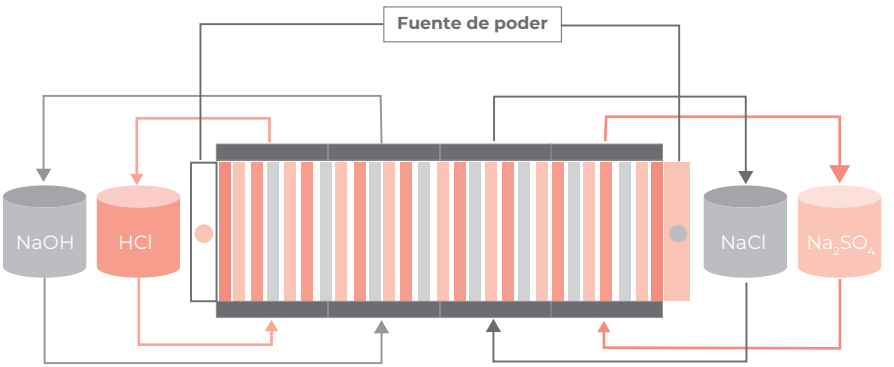
La única forma de permitir el flujo de carga a través de estas membranas es disociando el agua en iones H+ y OH- cuando la batería está en modo de carga, y formando agua cuando la batería está en modo de descarga (figura 11). Para diseñar baterías BF-ED-AB de mayor voltaje, se deben apilar en serie varios conjuntos de tres compartimientos "sal-ácido-sosa"; para baterías de mayor capacidad de corriente, es el área activa, o la superficie de las membranas lo que debe aumentarse.

Figura 10. Esquema del funcionamiento de una batería de flujo de electrodiálisis ácido-base, *a*) modo carga, *b*) modo descarga.



Fuente: elaboración propia (2024).

Figura 11. Esquema de una batería de flujo de electrodiálisis ácido-base



Fuente: elaboración propia (2024).

Algunas ventajas de las BF-ED-AB son: *1*) trabajan con circuitos cerrados, sin efluentes ni emisiones contaminantes; *2*) no requieren de metales preciosos ni de tierras raras para la fabricación de sus componentes; *3*) los fluidos de trabajo no representan un peligro serio para la salud de las personas ni para el ambiente y son de bajo costo, y *4*) pueden almacenar grandes cantidades de energía a bajo costo mediante tanques de gran tamaño construidos de materiales convencionales, como el PVC y el polietileno. Algunas desventajas son: *1*) la densidad de potencia y de energía de las BF-ED-AB son bajas comparadas con otras tecnologías, por lo que no son viables para aplicaciones móviles ni portátiles y *2*) las eficiencias de operación (30 a 70%) son mucho menores a las de las baterías convencionales (Yan et al., 2021; Hou et al., 2024).

BATERÍAS REDOX ORGÁNICAS

Las baterías de flujo redox que existen a escala comercial utilizan como especies electroactivas metales como vanadio y zinc/bromuro. En fechas recientes han surgido nuevas tecnologías que utilizan

moléculas orgánicas, entre las que se encuentran las baterías híbridas –parte orgánica e inorgánica– y las baterías de flujo redox orgánicas, o ORFB (Li et al., 2022).

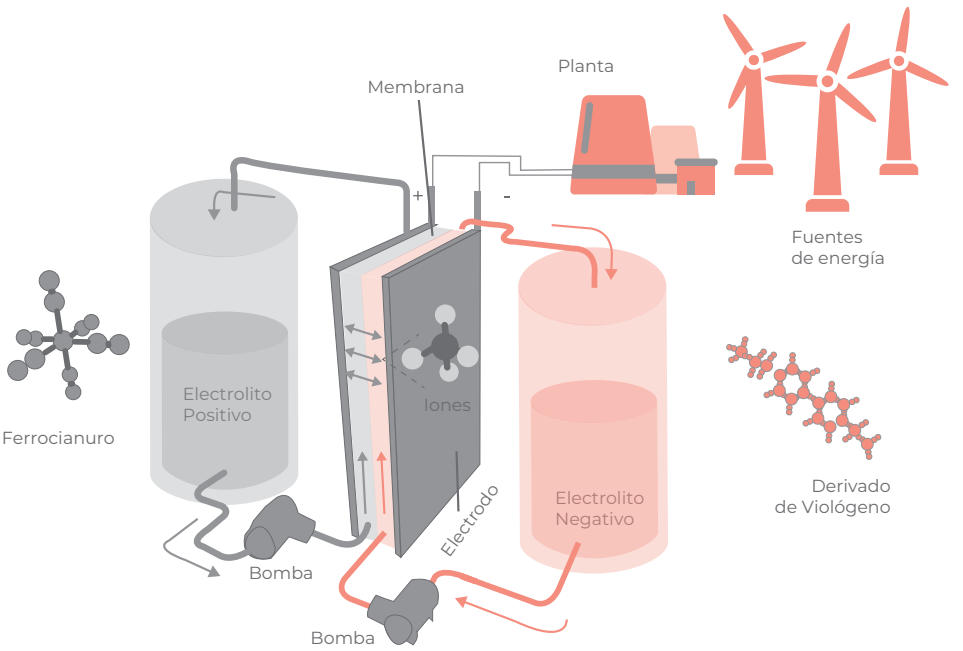
Al igual que las baterías de flujo convencionales, las ORFB constan de: *1*) un conjunto de celdas electroquímica apiladas en serie conformadas por electrodos, membranas y electrolitos; *2*) por lo menos dos tanques de almacenamiento de soluciones de compuestos redox; *3*) balance de planta con tuberías, sensores, bombas y sistemas de control, un esquema se muestra en la figura 12 (Service, 2018).

Las celdas electroquímicas de las ORFB cuentan con dos compartimentos, cada uno contiene un electrodo que está en contacto con las especies electroactivas en disolución. Estos compartimentos se encuentran aislados por una membrana separadora cuya función es conducir iones entre ellos. Las especies electroactivas fluyen a través de la celda electroquímica llevando a cabo la conversión de energía mediante reacciones de óxido-reducción, de esta manera la energía eléctrica se convierte en energía química. El voltaje de la celda que se puede obtener está dado sobre todo por la diferencia de potencial de óxido-reducción de las especies electroactivas; el voltaje de cada celda es pequeño (1 a 1.5 volts), por lo que se deben apilar varias celdas para alcanzar las potencias requeridas en aplicaciones de soporte a las redes eléctricas.

En las ORFB, las especies electroactivas en disolución fluyen por la celda electroquímica y se almacenan en tanques. Dependiendo del electrodo al que se encuentren conectados, las especies electroactivas almacenadas se conocen como electrolito positivo –o posolito– y electrolito negativo -o negolito-. La capacidad de almacenamiento de energía en los tanques depende de la concentración de las especies electroactivas en disolución. Al igual que otras baterías de flujo, el diseño separado entre la celda electroquímica y los tanques en las ORFB permite que la conversión –potencia– y almacenamiento de energía –capacidad– puedan escalar de manera independiente, es decir, la capacidad de una batería

puede incrementarse con tan sólo hacer más grandes los tanques. De esta forma se han logrado alcanzar densidades de energía de hasta 10 MWh.

Figura 12. Esquema general de una batería de flujo redox



Fuente: adaptado de Service (2018).

Las ORFB tienen el potencial de ser alternativas de almacenamiento a gran escala de menor costo que otras baterías de flujo, menor impacto ambiental y mayor seguridad (Li et al., 2022). Existe una gran variedad de moléculas orgánicas que se pueden explorar como especies redox para las ORFB, las cuales pueden sintetizarse por diversos medios. Un campo activo de investigación actual es el diseño y síntesis de nuevos compuestos orgánicos redox de alta solubilidad, bajo costo de fabricación,

amigables con el ambiente, potenciales redox mayores a 1.5 volts y que sean estables químicamente (Tabor, 2018); estas propiedades se pueden predecir y ajustar mediante métodos computacionales como el aprendizaje de máquina y el cribado molecular, lo que permite una exploración eficiente del espacio molecular (Cheng et al., 2015; Luo et al., 2019; Singh et al., 2019).

CAPACIDADES EN DESARROLLO DE BATERÍAS DE FLUJO EN MÉXICO

En México existen grupos de investigación con conocimientos necesarios para el diseño, fabricación y prueba de baterías de flujo; desde el modelado, simulación y estudios de factibilidad económica hasta la fabricación de prototipos de áreas activas de 1 000 cm^2, la tabla 6 resumen las instituciones mexicanas con experiencia en el estudio y desarrollo de baterías de flujo.

Tabla 6. Instituciones mexicanas con experiencia en el estudio y desarrollo de baterías de flujo

FORTALEZA	INSTITUCIONES
Modelado y simulación	• Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán - UNAM • Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) • Universidad de Guanajuato
Desarrollo de pares redox	• Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (Cideteq) • Universidad de Guadalajara • Universidad Autónoma de Zacatecas • Facultad de Química, UNAM
Estudios de factibilidad	• Universidad Autónoma de Yucatán
Prototipos	• Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL)

Fuente: elaboración propia (2024).

SALES FUNDIDAS

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA Y DE SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los sistemas de almacenamiento mediante sales fundidas son una forma de almacenamiento térmico empleada en ciertos diseños de plantas de generación de energía solar concentrada (CSP, por sus siglas en inglés), para almacenar y gestionar la energía térmica generada por la radiación solar. Estas centrales solares incorporan sistemas de almacenamiento térmico basados en fluidos de alta capacidad calorífica.

Una planta de CSP cuenta con unos espejos o heliostatos que concentran la radiación solar en un receptor central. En lugar de generar electricidad directamente a partir de la radiación solar, los sistemas de almacenamiento mediante sales fundidas capturan el calor concentrado para calentar sales fundidas específicas, generalmente sales de nitrato o nitrito de potasio. Las sales fundidas actúan como un medio de almacenamiento térmico eficiente, a medida que se calientan, absorben y retienen la energía térmica (Portillo, 2024).

Una vez que las sales alcanzan su estado líquido y hasta antes de su punto de ebullición, si se les retira el calor y se les almacena en este estado, permanece líquida y van perdiendo 1 °C cada 24 h; es decir, tienen una alta capacidad de almacenamiento calorífico interno. Con lo anterior, y con las debidas precauciones, se puede manejar como un líquido (ya que, a estas temperaturas, su densidad es de 1.88 ton/m^3), y en esta fase se le puede hacer pasar por intercambiadores de calor –generadores de vapor– y producir vapor de alta calidad –super saturado–, ya que tiene un rango de "ceder calor" de hasta 300 °C.

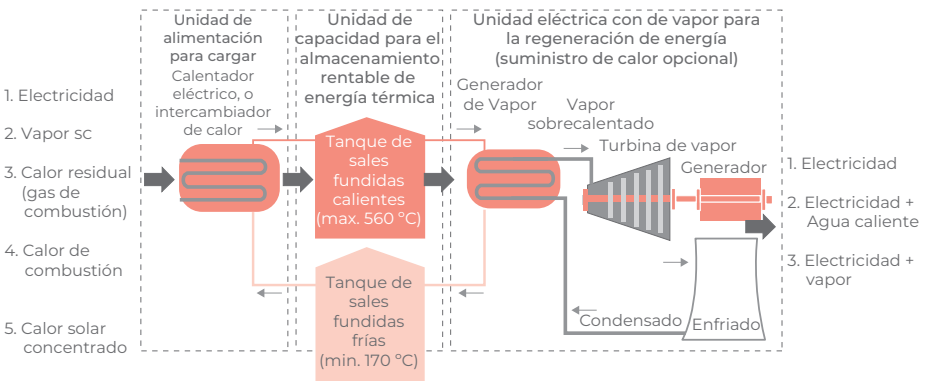
Cuando la mezcla ha "cedido" su calor, y manteniéndola siempre arriba de su punto de fusión, se puede volver a recalentar y volver a "donarle o recargarle calor", y repetir el ciclo.

Lo anterior convierte a la mezcla de sales en el mejor sistema de almacenamiento térmico disponible actualmente. De aquí la importancia de ser estudiado, desarrollado y dominado por técnicos mexicanos, para incorporar a procesos industriales claves —e incluso estratégicos—, como la industria eléctrica nacional.

COMPONENTES Y DIAGRAMA DESCRIPTIVO

El fluido más usado para almacenar energía térmica en estas centrales solares de concentración es la mezcla binaria 60% $NaNO_3$ + 40% KNO_3 (Mayo del Río, 2017) la cual ha permitido alcanzar hasta 15 horas de almacenamiento energético. Estas sales en su estado natural a temperatura ambiente son sólidas, pero al mezclarlas y aplicarles calor, a los 260 °C empieza su punto de fusión, y permanecen en estado líquido hasta cerca de los 621 °C, donde comienza su estado de ebullición y posterior evaporación.

Figura 13. Opciones para la utilización de tecnología de almacenamiento de sales fundidas

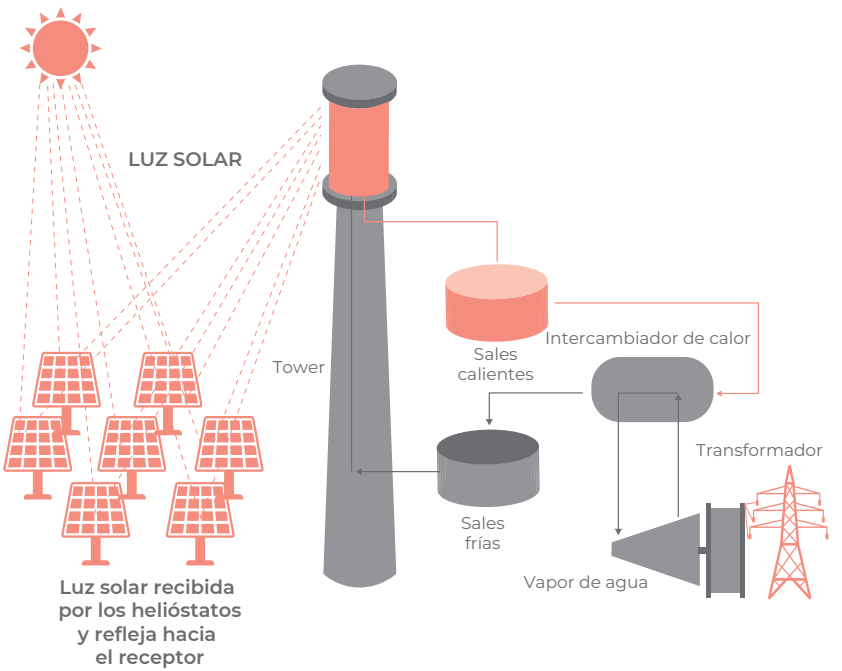


Nota: Unidad de potencia para carga (izquierda); unidad de capacidad para almacenamiento (medio); unidad de generación de energía para descarga (derecha).
Fuente: adaptado de Bauer y colaboradores (2021).

En la figura 13 se muestra un esquema de las opciones para la utilización de tecnología de almacenamiento de sales fundidas con tres subsistemas. Como se muestra en la figura, las fuentes energéticas para fundir las sales pueden ser varias, entre ellas la energía solar que provee una planta de energía solar concentrada (Bauer et al., 2021).

La figura 14 presenta un esquema de una planta de torre central con almacenamiento térmico (Rico Secades, 2011). La figura 15 muestra una fotografía de la planta termosolar CSP de Delingha 50 MW (Reve, 2020), construida por la empresa Supcon Solar de China, cuenta con una unidad de almacenamiento térmico de sales fundidas que le permite operar siete horas después de que el sol se oculta.

Figura 14. Diagrama de una planta de generación de potencia termosolar de torre central



Fuente: Rico-Secades (2011).

Figura 15. Planta termosolar de energía solar concentrada de Delingha 50 MW, por Supcon Solar China



Nota: La planta dispone de siete horas de almacenamiento.
Fuente: Reve (2020).

APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La principal aplicación para la cual fue desarrollada la tecnología de almacenamiento térmico de sales fundidas es la generación de electricidad en plantas termosolares de potencia, tanto de torre central, como de canal parabólico. Sin embargo, existe un amplio potencial de aplicaciones de esta tecnología en el sector industrial, como calor de proceso. Dependiendo del rango de temperaturas, se ajustaría el requerimiento de almacenamiento térmico. A altas temperaturas, hoy en día se investigan aplicaciones en las industrias cementera y metalúrgica.

La tecnología de sales fundidas que se ha planteado tiene como ventajas:

1. Utilizar como fuente de energía primaria la energía solar, muy abundante y de muy buena calidad en el país.
2. Tienen un bajo grado de contaminación ambiental.
3. No son inflamables.

4. Se utilizan compuestos abundantes.
5. Las sales poseen baja presión de vapor, muy inferior a los aceites sintéticos.
6. Las sales son sólidas a temperatura ambiente, por lo que en caso de fuga se solidifican, y
7. No se degradan con el tiempo, de modo que se considera que su vida útil coincide con la de la planta (Mayo del Río, 2017).

La desventaja más notable del uso de las sales fundidas en la planta CSP, está relacionado con problemas de corrosión. La corrosividad de las sales fundidas puede provocar daños en los materiales utilizados en el sistema de almacenamiento y transferencia de calor. Las sales fundidas a altas temperaturas pueden ser corrosivas para ciertos metales y materiales refractarios. Esto puede resultar en la degradación y deterioro de los componentes del sistema con el paso del tiempo, lo que lleva a costosas reparaciones y reemplazos.

Además, la corrosividad también puede afectar la eficiencia del sistema, ya que los materiales corroídos pueden contaminar las sales fundidas y afectar la transferencia de calor. La gestión de la corrosión en sistemas que utilizan sales fundidas puede requerir la implementación de medidas de control, como el uso de materiales resistentes a la corrosión y la aplicación de recubrimientos protectores. Existen estudios de aditivos que disminuyen los procesos corrosivos; sin embargo, es un tema en el que se sigue trabajando (Wu et al., 2017).

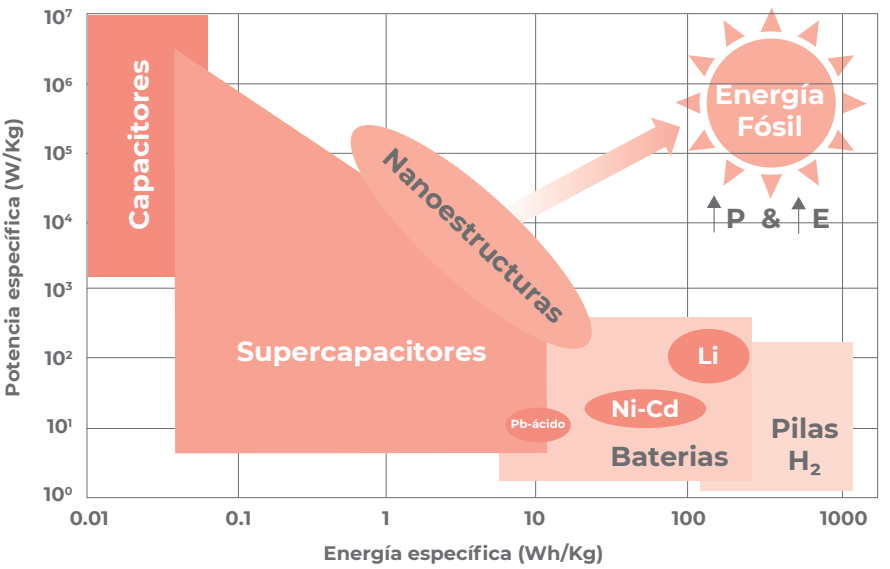
SUPERCAPACITORES ELECTROQUÍMICOS

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA Y DE SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los supercapacitores (SC), conocidos también como capacitores electroquímicos o ultra-capacitores, son dispositivos de almacenamiento de

energía que cuentan con los mismos componentes básicos de una batería: dos electrodos y un electrolito. Estos dispositivos cubren la brecha entre los capacitores electrostáticos tradicionales y las baterías recargables en términos de energía y potencia específica. De todos los dispositivos de almacenamiento de energía, los capacitores convencionales tienen la habilidad de dar la energía en el menor tiempo posible, dando como resultado una alta potencia (hasta 10000 kW/Kg) y la menor energía específica (hasta 0.08 Wh/kg).

Figura 16. Gráfico Ragone donde se pueden ubicar los dispositivos de almacenamiento de energía



Nota: Se han incluido la energía que proviene de combustibles fósiles y las nanoestructuras que dan pie a mejores dispositivos.
Fuente: elaboración propia con base en (Atta y Fahim, 2021; Alcaraz-Espinoza y de Oliveira, 2022; Mayrén et al., 2024).

La figura 16 muestra el gráfico de Ragone como una representación visual de la densidad de energía frente a la potencia específica para

diferentes dispositivos de almacenamiento de energía donde se observan el rango cubierto por los supercapacitores. Los supercapacitores almacenan energía en una interfaz electroquímica, aprovechando la formación de la doble capa eléctrica para acumular iones en la superficie de electrodos porosos. Este principio de almacenamiento electrostático permite una carga y descarga rápida, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren una liberación rápida de energía, como frenado regenerativo en vehículos eléctricos o estabilización de redes eléctricas (Atta y Fahim, 2021).

COMPONENTES PRINCIPALES Y DIAGRAMA DESCRIPTIVO

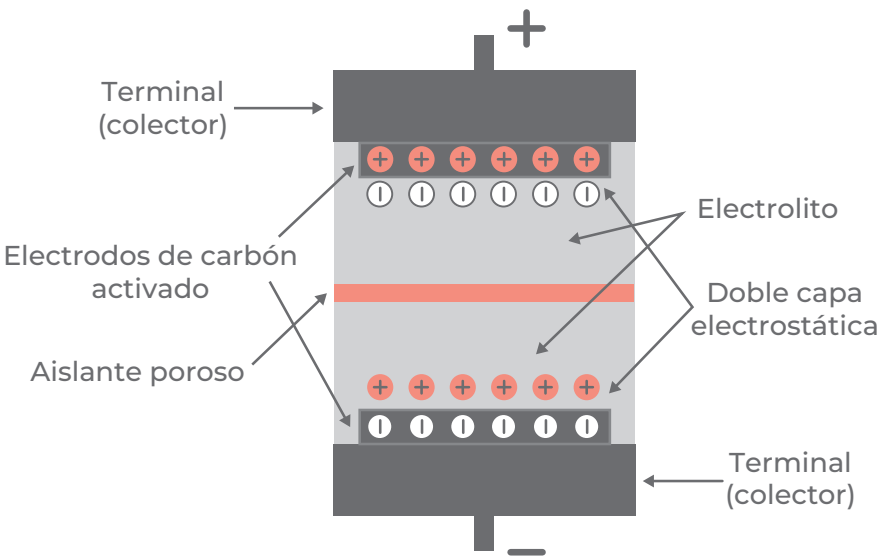
1. *Electrolito.* Los SC comerciales usan electrolitos orgánicos obtenidos a partir de solventes derivados del petróleo, que son más costosos, emiten gases de efecto invernadero y son difíciles de reciclar. Sin embargo, estos electrolitos permiten aumentar el voltaje y por ende la energía específica. No obstante, varias compañías empiezan a proponer prototipos con electrolitos base agua, los cuales permiten mayor potencia.
2. *Separador.* Muchos de los separadores son membranas poliméricas que son costosas y que también emiten gases no deseados al ambiente durante su gasificación. Por ello, el desarrollo de separadores a base de polímeros naturales como la celulosa es muy deseable.
3. *Colectores de corriente.* Por lo regular, los colectores de corriente de la mayoría de los dispositivos de almacenamiento de energía son metálicos, sin embargo, el uso de colectores de corriente a partir de materiales de carbón de gran conductividad eléctrica es deseable, siempre y cuando sea carbón mineral o que el carbón no se obtenga de combustibles fósiles
4. *Electrodos.* Los electrodos están fabricados con materiales electroactivos, que en el caso de los SC el material principal es el carbón

activado. Estos materiales pueden elaborarse a partir de residuos agroindustriales, y al ser gasificados hacen parte del ciclo natural del CO_2.

5. *Aglutinantes*. En todos los dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica se usan aglutinantes para elaborar electrodos. Por ejemplo, en la fabricación de baterías de litio se utiliza el polímero PVDF, en las celdas de combustible nafion y en SC se utiliza el teflón. Todos estos aglutinantes emiten fluoro-carbonos al ser incinerados, por lo que urge la exploración de nuevos aglutinantes que puedan ser polímeros naturales como la celulosa.

En la figura 17 se muestra un esquema de un supercapacitor y sus componentes principales (Fornaro, 2023).

Figura 17. Esquema de los componentes de un supercapacitor



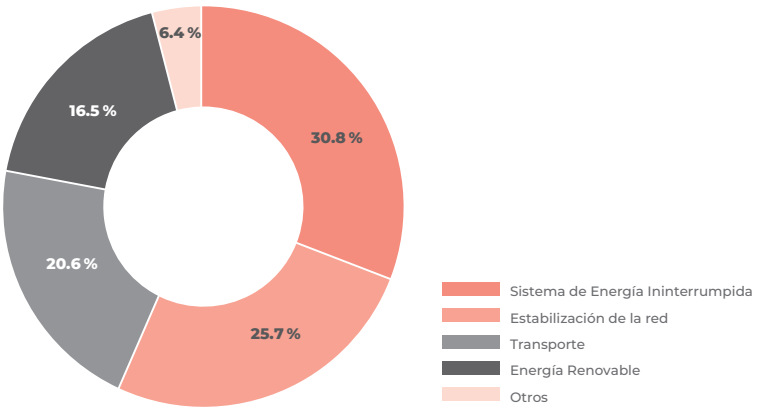
Fuente: Fornaro (2023).

APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

El dispositivo de almacenamiento de energía más utilizado ha sido la batería para diferentes aplicaciones. Sin embargo, su gran problema y limitación tecnológica radica en su corto ciclo de vida, pero la sociedad ha aprendido a tolerar esta deficiencia debido a la ausencia de alternativas (Alcaraz-Espinoza y de Oliveira, 2022)

Recientemente, las demandas de potencia en una gran variedad de aplicaciones han incrementado, excediendo las prestaciones de las baterías y haciéndolas una alternativa insuficiente. De esta manera, los SC pueden almacenar de 3 a 30 veces más potencia durante un ciclo de vida prolongado que una batería de tamaño similar, haciendo a estos SC una tecnología atractiva. Por lo que estos dispositivos son la solución de potencia para aplicaciones de electrónica, energía renovable, industria automotriz, transporte y tecnología de información a nivel consumidor e industrial (figura 18) (Fortune Business Insights, 2023; Fortune Business Insights, 2024).

Figura 18. Aplicaciones de los supercapacitores en el mercado de los Estados Unidos



Fuente: Fortune Business Insights (2023).

Por ejemplo, en el sector industrial los SC han sido los dispositivos de almacenamiento ideal para la generación de energía renovable a partir del viento, ya que estos dispositivos no son dependientes del voltaje como las baterías y pueden soportar los cambios de velocidad del viento (Olabi et al., 2022; Maxwell, 2024). Además, se usan en todas las aplicaciones repetitivas, como elevadores de servicio en puertos marítimos donde el SC se descarga durante el levantamiento y se carga durante la caída. En el sector automotriz, se han ajustado en el sistema de frenado para recargarse al frenar y dar la energía al acelerar. En la red eléctrica, los SC pueden ser utilizados para eliminar o modular los picos de potencia (Chemicon, 2024).

Los SC presentan las siguientes ventajas cuando se les compara con las baterías recargables.

1. Al llevar a cabo todos sus procesos electroquímicos en la superficie del material, los hace independientes de que la carga tenga cierto nivel de voltaje como en las baterías recargables. En las baterías recargables el material de electrodo presenta cambios químicos, los cuales se presentan a un voltaje específico, haciéndolas dependientes del voltaje al momento de cargarse y descargarse.
2. Su rápida propagación de la carga, resultando en su característica alta potencia específica.
3. Ciclos de vida largos ya que no se presenta ninguna transformación de fase cristalina de los materiales de electrodo como en las baterías; y pueden descargarse por completo.

Algunas de las desventajas son:

1. Su baja energía específica y su autodescarga. Por lo tanto, la energía que se almacena en un SC tiene que usarse lo más rápido

posible. A veces una batería se puede adaptar en un SC para almacenar la energía que se pierde durante su autodescarga.
2. Los SC comerciales se construyen utilizando materiales activos de carbón de gran área superficial y electrolitos orgánicos o no-acuosos. Por lo que una de las desventajas de los SC comerciales son la toxicidad de su electrolito orgánico (similar al de las baterías de litio) y su baja energía específica (5-10Wh/kg).
3. Para convertir a los SC en dispositivos amigables con el medio ambiente es necesario la utilización de electrolitos acuosos y que los materiales de carbón se obtengan de manera sustentable.

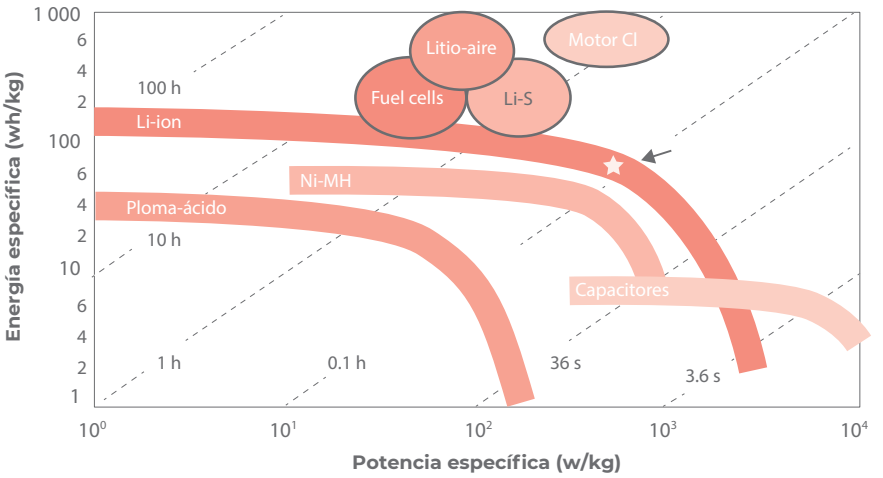
BATERÍAS LITIO-AZUFRE LI-S

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA Y DE SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Las baterías de litio-azufre Li-S se perfilan como una alternativa que responde a la mayoría de las demandas de almacenamiento de energía (figura 19) (Srinivasan, 2008). El azufre (S) es uno de los elementos de mayor abundancia en la naturaleza —el décimo más abundante en la corteza terrestre— y es considerado un subproducto de diversas industrias por lo que es de bajo costo. Debido a su baja temperatura de fusión y sublimación, los procesos de reciclado se ven facilitados y al ser no tóxico, el impacto ambiental sería menor (Castelvecchi, 2021).

Con relación a su capacidad de almacenamiento, el S posee una capacidad teórica de 1675 mAh·g-1, lo cual es más de cinco veces el límite teórico de su contraparte basada en óxidos metálicos (250 $mAh \cdot g^{-1}$) (Ji et al., 2009; Liu et al., 2013; Yuan et al., 2016; Bhargav et al., 2020; Xu et al., 2020). Estas baterías se consideran una alternativa prometedora a las baterías de ion de litio convencionales debido a su mayor densidad de energía teórica y menor costo de producción.

Figura 19. Gráfica de Ragone donde se compara a las Li-S con otras tecnologías de almacenamiento de energía y dispositivos de conversión



Fuente: adaptado de Srinivasan (2008).

El principio de su funcionamiento se basa en tres reacciones:

1. *Reacciones en el ánodo (litio).* Durante la descarga de la batería, los iones de litio se desplazan desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito. En el ánodo, el litio se oxida y libera electrones en el proceso.
2. *Transporte a través del electrolito.* Los iones de litio se desplazan a través de un electrolito líquido o sólido que separa el ánodo y el cátodo. Este electrolito permite el movimiento de iones, pero evita el flujo directo de electrones, forzándolos a viajar por un circuito externo para completar el circuito eléctrico.
3. *Reacciones en el cátodo (azufre).* En el cátodo, los iones de litio se combinan con azufre para formar compuestos como Li_2S durante la descarga.
4. *Carga.* Durante la carga el proceso se invierte. Los iones de litio se desplazan desde el cátodo hasta el ánodo, y el azufre en el cátodo vuelve a su forma original.

COMPONENTES Y DIAGRAMA DESCRIPTIVO

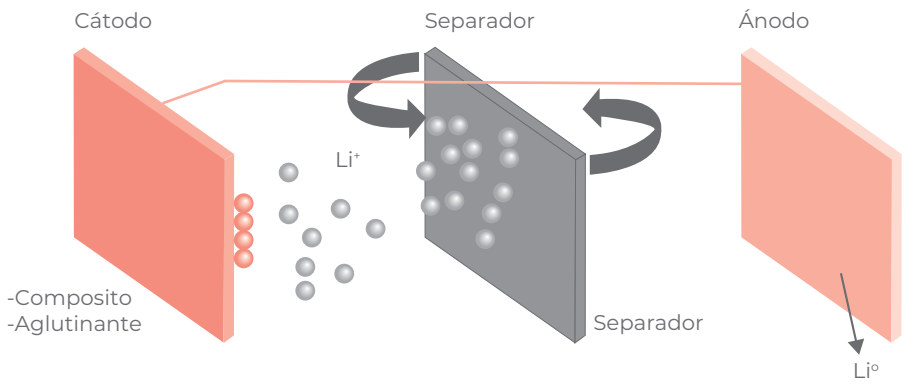
Las baterías Li-S están compuestas por un cátodo, un separador, un electrolito, y un ánodo (figura 20).

1. *Cátodo.* Es el elemento principal de las Li-S, es donde se encuentra el S y de él depende, la capacidad final de la batería. Está constituido por un colector de corriente, material activo, conductor electrónico y un aglutinante (binder). El colector de corriente suele ser una lámina fina de aluminio, una malla de níquel, o papel carbono conductor.
2. *Material activo.* Se utiliza el S puro, sin embargo, es necesario considerar su grado de pureza y la fuente de donde se obtiene ya que pequeñas impurezas pueden comprometer la capacidad de almacenamiento.
3. *Conductor electrónico.* En las Li-S son utilizados alótropos de carbono con una estructura grafítica, entre estos destaca el carbono súper P o negro de humo por su alta conductividad, bajo costo y producción en serie. Existen otros materiales como el grafeno, los nanotubos de carbono o las fibras de carbono que también han mostrado una mejora en el desempeño de las de litio-azufre.
4. *Aglutinante.* Constituye apenas un 10% del total del cátodo, su función es primordial, ya que depende de la cohesión, adhesión, dispersión y compatibilidad entre los componentes del cátodo y la vida útil de la Li-S.
5. *Separador.* Por lo general, es una membrana porosa y elaborada de un material aislante eléctrico que permite separar el ánodo y el cátodo, pero los conecta de forma iónica. El separador suele estar constituido de poliolefinas como el polipropileno, sin embargo, debido a la naturaleza del S y la necesidad de un ánodo de litio, se han desarrollado separadores de otros materiales que evitan la migración de polisulfuros y la formación de dendritas en el ánodo de litio.

6. *Ánodo.* El litio metálico se considera el material preferido para las Li-S por su baja densidad gravimétrica (0.59 g. cm^3), su capacidad teórica (3860 mAhg-1) y su potencial redox (-3.040 V).
7. *Electrolito.* A diferencia de las baterías de intercalación, no es posible trabajar el sistema de litio-azufre con electrolitos de tipo carbonato debido al alto grado de solubilidad del azufre en estos disolventes. Los electrolitos de trabajo para el sistema de Li-S se constituyen a base de disolventes orgánicos, la mayoría de ellos, provenientes de la industria petroquímica, de entre los que destacan: tetra (Etilen glicol), dietiléter (tetraglime), tri (Etilen glicol), Dimetil éter (triglime), di (Etilen glycol), Dimetil éter (diglime), 1,3-dioxolane (DOL) y 1, 2-dimethoxyethane (DME).

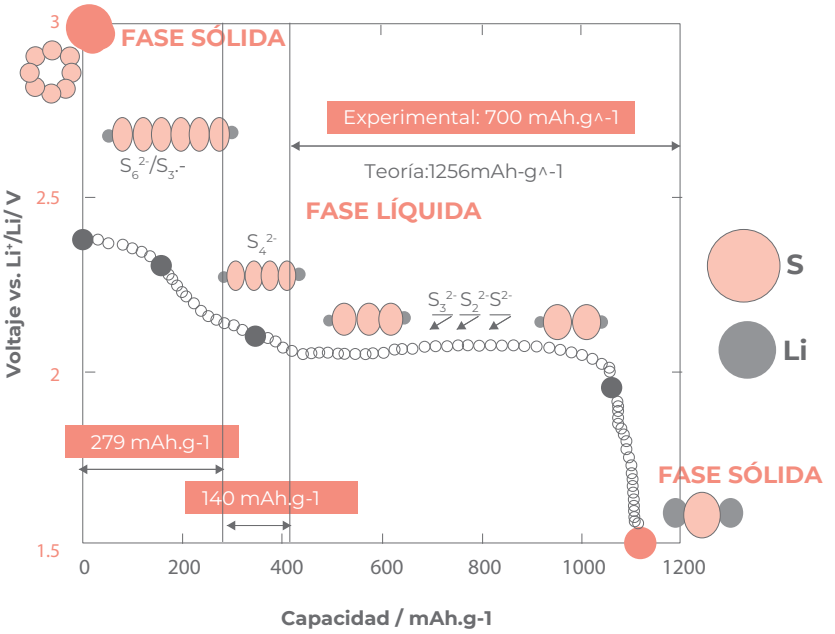
La figura 20, muestra un diagrama descriptivo de una Li-S y la figura 21, muestra un esquema de un perfil de descarga típico de la batería litio-azufre donde se muestra la formación de polisulfuros.

Figura 20. Esquema general de una batería litio-azufre



Fuente: adaptado con base en Mayrén y colaboradores (2024).

Figura 21. Esquema de un perfil de descarga típico de una batería de litio-azufre con especies representativas (Barchasz et al., 2012)



Reacción	Potencial vs Li+/Li	
$2Li^+ + 2e^- + S_8 \leftrightarrow Li_2S_6 + \frac{1}{4}S_8$	2.4 V	(i)
$2Li^+ + 2e^- + 2Li_2S_6 \leftrightarrow 3Li_2S_4$	2.1 V	(ii)
$6Li^+ + 6e^- + Li_2S_4 \leftrightarrow 4Li_2S$	1.95 V	(iii)

Nota: En la tabla se describe un mecanismo de reacciones redox globales.
Fuente: adaptado de Barchasz (2012).

APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Debido al bajo peso de sus componentes y bajo costo, –comparado con otras químicas de baterías (McKerracher, 2020)–, serían adecuadas

para reducir el peso de los sistemas de almacenamiento y ofreciendo cantidades de energía significativos. Por ello, sus nichos de aplicación son amplios y van desde aplicaciones en teléfonos celulares y dispositivos móviles, hasta automóviles eléctricos o híbridos (Fang et al., 2017). Existen en la actualidad aplicaciones de prototipos de baterías de Li-S en drones y en satélites, estas Li-S son recargadas mediante paneles solares (Li et al., 2018).

En cuanto aplicaciones estacionarias se espera que paquetes de baterías de Li-S puedan ser diseñadas para micro redes y redes alimentadas por energías alternativas como la solar o eólica. Su espectro de aplicación es amplio y sólo podrá ser posible hasta que se resuelvan los problemas de ciclabilidad y seguridad asociada al uso de azufre y litio metálico como ánodo.

Ventajas potenciales:

1. Las baterías de Li-S pueden tener mayor densidad de energía teórica que las de ion de litio convencionales, por lo que pueden almacenar más energía por unidad de peso.
2. Los materiales utilizados en las baterías de Li-S son más abundantes y menos costosos en comparación con algunos de los materiales utilizados en las baterías de ion de litio tradicionales, lo que podría llevar a un menor costo de producción.
3. La abundancia de litio y azufre en la naturaleza y la posibilidad de utilizar materiales más sostenibles podrían hacer que las baterías de Li-S sean una opción más respetuosa con el medio ambiente.
4. Respecto a las ventajas ambientales del azufre es que es benigno con el medio ambiente en su estado elemental y su extracción del petróleo podría reducir de forma considerable las emisiones de dióxido de azufre al ambiente, un gas muy contaminante.

Desventajas:

1. Una de las principales dificultades del S puro y sus diferentes especies químicas como material activo es su naturaleza aislante al transporte de iones y electrones —el S presenta una resistencia eléctrica de alrededor de 1 030 Ω—. De tal forma que cuando es utilizado de forma pura se produce una subutilización del material activo, una baja tasa de transferencia y una alta polarización en la celda, alejándose de la capacidad teórica (Seh et al., 2013; Yuan et al., 2016).
2. Las baterías de Li-S también enfrentan desafíos tecnológicos, como la formación de polisulfuros y la estabilidad del electrodo durante ciclos de carga y descarga, lo que puede afectar su vida útil y rendimiento a largo plazo.
3. Como ánodo, el litio metálico puede reaccionar fácilmente con el electrolito por su alta actividad química, lo que lleva a una eficiencia de ciclado baja. La formación de dendritas sobre la superficie del ánodo de litio hace que las Li-S sean muy inseguras para aplicaciones prácticas por la posibilidad de perforar el separador y producir un corto circuito.
4. Uno de los mayores desafíos para el desarrollo de baterías, es que el S como cátodo es un material del tipo conversión, esto implica que durante los procesos redox asociados a la carga/descarga ocurra una transición de fase sólido-líquido-sólido. Como consecuencia las celdas de Li-S experimentan cambios composicionales y estructurales como una expansión volumétrica, la generación de especies de polisulfuros solubles en el electrolito y la precipitación de especies no conductoras en el ánodo de litio metálico (Li_2S) (Bhargav et al., 2020).
5. Otra desventaja es que se tendría una batería de baja potencia, pues su intervalo de operación oscila entre 1.5 y 2.6 V (vs Li^+/Li),

en contraste, algunos tipos de baterías de iones de litio (BIL) pueden operar hasta los 4V.

BATERÍAS DE LITIO DE ESTADO SÓLIDO

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA Y DE SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La tecnología de baterías de litio de estado sólido (BES) incorpora electrodos de metal sólido (Li) y un electrolito sólido. El principio de funcionamiento es muy similar al de las BIL, en el proceso de carga los iones de litio se separan del material catódico, viajan a través de las capas del electrolito/separador sólido, y llegan al ánodo, (Li) donde se depositan y comienza a crecer la capa. En la descarga los iones regresan por el mismo camino y vuelven a incorporarse en el material activo. La incorporación del electrolito sólido permitirá el diseño de baterías más pequeñas, lo que significa menos peso, pero lo más importante es que se espera que las BES superen las limitaciones actuales de la densidad de energía.

De acuerdo con (Liu et al., 2024) se espera que el uso de litio metálico como ánodo duplique la capacidad de la tecnología puesto que el litio metálico tiene una capacidad diez veces mayor que los ánodos de carbono estándar –grafito– utilizados en las BIL actuales. Sin embargo, esta tecnología aún está en desarrollo.

COMPONENTES PRINCIPALES Y DIAGRAMA DESCRIPTIVO

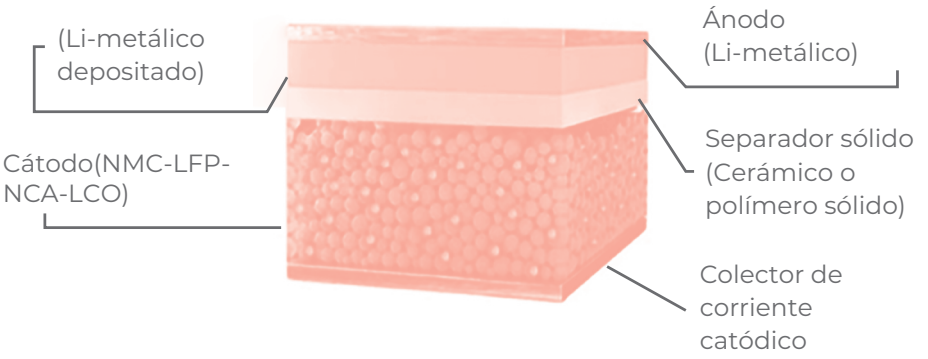
Para que la BES funcionen, requieren tres componentes: *1*) el cátodo; *2*) el ánodo, y *3*) el electrolito sólido, que también funciona como separador. Algunos de los componentes se presentan en la tabla 7 y el diagrama descriptivo se muestra en la figura 22.

Tabla 7. Partes y componentes de una batería de litio de estado sólido

CÁTODO		ÁNODO		SEPARADOR/ ELECTROLITO	
Fosfato de litio y hierro	LFP	Litio Metálico de alta pureza	Li	Por lo general, cerámicos, vidrio (Si), sulfuros o polímeros sólidos	
Óxidos de litio, níquel, manganeso y cobalto	NMC (NCM111, NCM523, NCM622, y NCM811				
Óxidos de litio, níquel, cobalto y aluminio	NCA			β-Li_3PS4 (LPS)	Sulfuro de litio y fósforo
				Li5.5PS4.5Cl1.5 (LPSCl)	Sulfuro de litio y fósforo clorado
Óxido de litio y cobalto	LCO			Li10SiP2S12	Sulfuro de litio, sílice y fósforo

Fuente: elaboración propia (2024).

Figura 22. Esquema de los componentes y funcionamiento de una batería de litio de estado sólido (Blain, 2020; Quantum-Scape, 2020)



Fuente: adaptada de Quantum-Scape (2020).

APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

A pesar de ser una tecnología en desarrollo, las BES también podrían aplicarse para energizar vehículos eléctricos debido a que prometen una mayor densidad de energía, una carga más rápida, un ciclo de vida más largo y una mayor seguridad en comparación con las baterías tradicionales de ion de litio. Esto las convierte en una de las mejores opciones para su uso en vehículos eléctricos, ya que podrían ampliar su autonomía y reducir los tiempos de carga.

También podrían aplicarse a electrónica de consumo para fabricar baterías más delgadas y eficientes para teléfonos inteligentes, computadoras y otros dispositivos portátiles. La mejora de la densidad de energía y la seguridad podría ofrecer un uso más prolongado entre cargas y un menor riesgo de incidentes térmicos. Al igual que las BIL, podrían implementarse en aviones eléctricos, drones y satélites, dispositivos médicos como marcapasos, bombas de insulina y audífonos. En almacenamiento de energía de fuentes renovables como la solar y la eólica.

Las baterías de estado sólido podrían ayudar también a garantizar la vida útil prolongada de sensores, dispositivos portátiles y otros dispositivos del "internet de las cosas" (IOT). Incluso podrían aplicarse en áreas más específicas como defensa militar, barcos y barcos eléctricos, tecnología portátil —*wearable*—, exploración aeroespacial y espacial (Crownhart, 2023).

En las BIL actuales el litio metálico forma dendritas, lo que compromete su vida útil y la seguridad. Reemplazar el electrolito líquido por uno de estado sólido —más seguro y rígido en términos mecánicos— disminuiría los riesgos asociados al crecimiento de dendritas y aumentaría la densidad de energía de la batería sin comprometer la seguridad. La tabla 8 resumen las ventajas y desventajas de esta tecnología frente a las BIL.

Tabla 8. Ventajas de las baterías de litio de estado sólido frente a las baterías de ion de litio.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
· Tamaño compacto	· Altos costos de producción, al ser una tecnología emergente
· Más ligeras	· Alta resistencia interna
· Mayor densidad de energía: 2.5 veces más	· Degradación del material activo
· Mayor seguridad, al no ser inflamables	· La producción en masa es una tarea difícil de realizar, debido a la indisponibilidad de material electrolítico sólido perfecto
· De cuatro a seis veces mayor grado de recarga	
· Excelente estabilidad térmica, pues utilizan cerámicos resistentes a altas temperaturas	

Fuente: elaboración propia con base en ChatGPT Open AI (2024).

BATERÍAS DE ION DE SODIO

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA Y DE SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los elementos de una batería de ion de sodio (BIS) son similares a los de una batería de ion de litio. Las BIS utilizan iones de sodio (Na^+) como portadores de carga. El electrolito de una BIS suele ser un líquido que contiene sales de sodio disociadas en disolventes polares próticos o apróticos. Durante la carga, los iones de sodio se mueven del cátodo al ánodo mientras los electrones viajan por el circuito externo. Durante la descarga, se produce el proceso inverso.

Las baterías de sodio representan una alternativa prometedora a las baterías de litio, especialmente en aplicaciones de almacenamiento a gran escala, donde la abundancia de materiales y la seguridad son

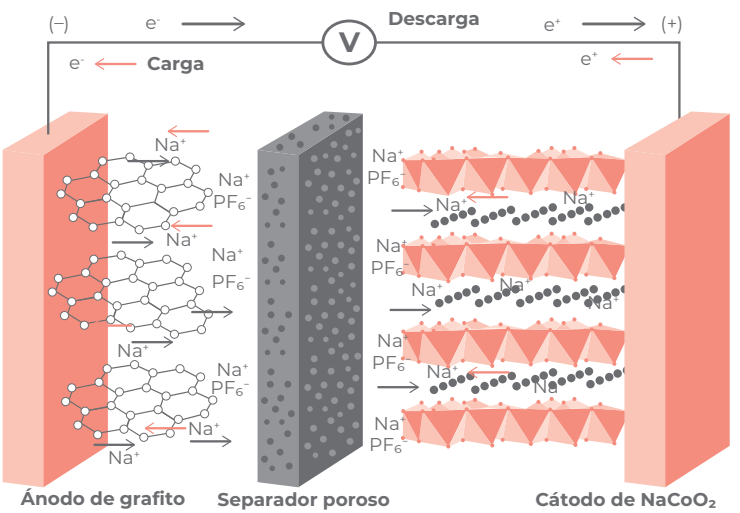
consideraciones importantes. Aunque enfrentan desafíos, la investigación en esta área está en marcha para mejorar sus características y rendimiento (He et al., 2024).

COMPONENTES PRINCIPALES Y DIAGRAMA DESCRIPTIVO

El material del cátodo de las BIS es compuesto a base de sodio, y el ánodo puede ser de diversos materiales, incluido el carbón duro. En la tabla 9 se muestran los componentes de la batería y algunas sustancias que se pueden utilizar.

La figura 23 muestra un diagrama descriptivo del funcionamiento de una BIS, esta incluye todos los componentes de una BIL, pero tanto el material activo como el electrolito están basados en compuestos de sodio (Abraham, 2020).

Figura 23. Esquema de los componentes y funcionamiento de una batería de ion de sodio



Fuente: adaptada de Abraham (2020).

APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Al igual que las baterías de litio y estado sólido, las de sodio podrían tener diversas aplicaciones. Por ejemplo, se podrían utilizar tanto en vehículos eléctricos como en camiones de transporte, lo que ofrecería una mayor autonomía en comparación con las baterías de ion de litio. Además, contribuirían a almacenar energía durante períodos de baja demanda y liberarla en los picos de demanda, por lo que ayudarían a bajar costes de electricidad y a mejorar la eficiencia energética. Como respaldo, este sistema de emergencia proporcionaría energía en caso de interrupción u otro tipo de incidencia, evitando detener actividades.

Las baterías de sodio podrían integrarse en estaciones de carga de vehículos eléctricos para dar una fuente de energía más estable y sostenible. Las baterías de sodio podrían incluso reemplazar los sistemas de litio e implementarse en cada una de las aplicaciones que en la actualidad domina esta tecnología.

La mayor ventaja de las BIS es la abundancia natural del sodio, que puede extraerse con facilidad del agua salada. Sin embargo, los retos para la adopción de las BIS incluyen una menor densidad energética y ciclos de carga-descarga insuficientes. Todavía no se comercializan vehículos eléctricos que utilicen baterías de iones de sodio. Las baterías de sodio se están investigando como una alternativa en potencia más segura y económica, pero aún están en desarrollo y no han adoptado la misma adopción generalizada que las de litio.

La tabla 10 resalta algunas diferencias clave entre las baterías de ion de sodio y las de ion de litio.

Tabla 9. Partes y componentes de una batería de ion de sodio

CÁTODO		ÁNODO	
Fosfato de sodio y hierro	$NaFePO_4$	Carbón duro (biomasa)	C
Fosfatos de sodio y vanadio Fluoro fosfato de sodio y vanadio	-$Na_3V_2(PO_4)_3$ - $Na_3V_2(PO_4)2F_3$		
		Carbón blando(biomasa)-nanomateriales	C
Hexacianoferrato de sodio y níquel	$Na_2NiFe(CN)_6$	Poliamidas	$(CO\text{-}NH\text{-}R)_n$
		Titanato de sodio	$NaTiO_2$
Fosfatos de sodio y titanio	$Na_3Ti_2(PO_4)_3$	Hexacianoferrato de sodio y níquel	$Na_2NiFe(CN)_6$

Tabla 10. Comparativa de las ventajas y desventajas de las BIS contra las BIL

COMPARATIVA DE LAS BIL VS LAS BIS	
BIL	**BIS**
Utilizan el litio como elemento central en su proceso de carga y descarga. El litio es liviano y puede almacenar energía en comparación con otros elementos químicos	Utilizan el sodio como elemento central en su proceso de carga y descarga. Aunque el sodio es más abundante y económico que el litio, las baterías de sodio aún están en etapas de desarrollo y no han alcanzado la misma madurez que las baterías de litio
DENSIDAD DE ENERGÍA	
Tienen una mayor densidad de energía en comparación con las baterías de sodio. Esto significa que pueden almacenar más energía en un espacio más pequeño, lo que las hace ideales para dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos	Tienen una densidad de energía más baja que las baterías de litio en la mayoría de las implementaciones actuales. Esto puede limitar su uso en aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos

SEPARADOR		ELECTROLITO	
Poliolefinas (Polímeros-Polipropileno, Polietileno)	$(C_3H_6)_n$	Hexafluorofosfato de sodio	$NaPF_6$ (sal de sodio)
		Perclorato de sodio	$NaClO_4$
Poliolefinas con revestimiento de nano-alúmina o bohemita de alta pureza	Oxihidróxido de aluminio AlO (OH).	Solventes	
		Etilen-carbonato	EC
		Propilen-carbonato	PC
		Dimetil-carbonato	DMC

Fuente: elaboración propia (2024).

SEGURIDAD	
A lo largo de los años, ha habido algunos incidentes de seguridad asociados con baterías de litio, como incendios y explosiones. Sin embargo, se ha trabajado en mejoras de seguridad y control para reducir estos riesgos	Las baterías de sodio se consideran más seguras que las de litio por sus propiedades químicas. Sin embargo, todavía se están investigando y desarrollando tecnologías para mejorar su seguridad en diversos escenarios
CICLOS DE VIDA Y DURABILIDAD	
Tienen una vida útil larga y pueden soportar numerosos ciclos de carga y descarga antes de degradarse de forma significativa	En su mayoría, las baterías de sodio todavía están en las etapas de desarrollo y pruebas, por lo que su vida útil y durabilidad pueden variar según la tecnología específica utilizada
COSTO	
A medida que la tecnología ha madurado y la demanda ha aumentado, los costos de las baterías de litio han disminuido de manera notable en los últimos años	Dado que las baterías de sodio aún no se desarrollan ni producen en masa, puede que sus costos iniciales sean más altos

Fuente: elaboración propia basada en Open AI (2024).

ESQUEMA DE SÍNTESIS DE TECNOLOGÍAS SEGÚN SU NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA EN EL CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO

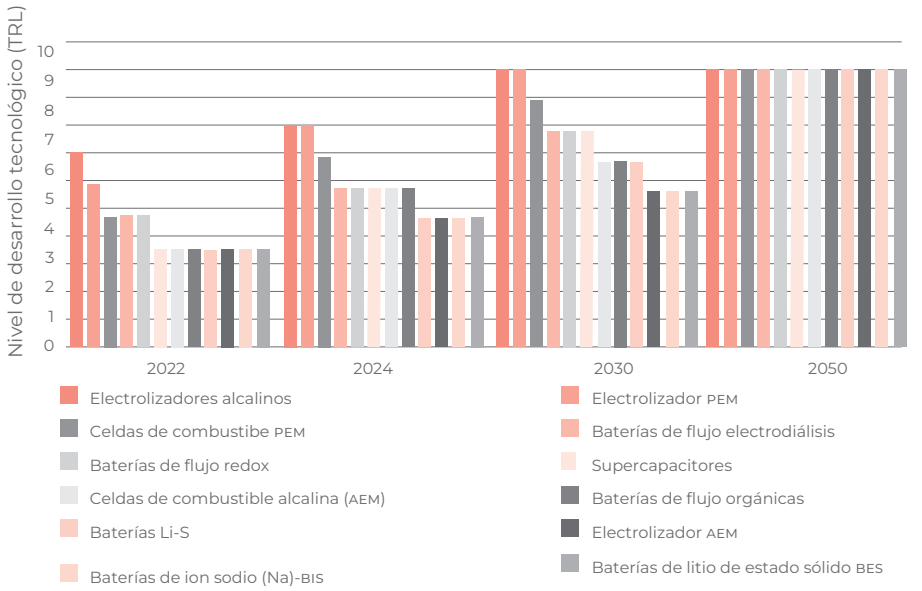
En los últimos años ha habido avances significativos en el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía alternativas a las baterías convencionales. Algunas de estas tecnologías ya están disponibles en el mercado; otras aún se encuentran en fase de desarrollo, enfrentando desafíos tecnológicos que se interponen para su aplicación a escala comercial.

En México, las tecnologías alternativas de almacenamiento de energía (TAAE) presentadas en este capítulo se encuentran en diversos niveles de desarrollo tecnológico; algunas están en una etapa inicial de investigación, principalmente a escala de laboratorio, mientras que otras ya están listas para su escalamiento. La etapa de escalamiento de nuevas tecnologías es justamente una de las de mayor riesgo en su ciclo de vida. Por lo tanto, es imperativo establecer eslabones efectivos y fomentar la colaboración multidisciplinaria entre diversos sectores (gobierno, empresas, academia, sociedad).

Para acelerar la maduración tecnológica, se está trabajando en la creación de una agenda nacional en materia de almacenamiento de energía y una regulación adecuada. Estos elementos serían clave para lograr avances más rápidos y, por ende, mayores beneficios para el país. Esto no sólo favorecería la descarbonización, sino que también reduciría la dependencia de los combustibles fósiles. La implementación de estas medidas contribuiría significativamente al cumplimiento de las metas climáticas de México y fortalecería el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) mediante la rápida penetración de energías renovables a gran y pequeña escala.

La figura 24 proporciona un esquema que muestra las tecnologías según su nivel de madurez tecnológica en el corto, mediano y largo plazo. Se espera que para el año 2050, todas las TAAE incluidas en este estudio, junto con otras no mencionadas, estén completamente desarrolladas como parte de un proceso continuo de innovación.

Figura 24. Evolución del nivel de desarrollo tecnológico de alternativas a baterías de litio como medios de almacenamiento de energía



Fuente: INEEL (2023).

INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN PARA ACELERAR EL CONOCIMIENTO Y DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN MÉXICO

A partir del consenso entre líderes de investigación en tecnologías nacionales de almacenamiento de energía diferentes a las baterías de litio, se identifica que las tecnologías que se encuentran en un nivel de desarrollo suficiente para lograr su implementación en dispositivos que operen en condiciones reales a corto plazo cuyo escalamiento puede darse de manera acelerada, con el objetivo de atender las crecientes necesidades de almacenamiento de energía de México, son:

1. Generación y almacenamiento de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua mediante:

    a. Electrolizadores de electrolito alcalino para la producción de hidrógeno verde destinado a la operación de centrales eléctricas de ciclo combinado en mezclas de gas natural e hidrógeno.
    b. Electrolizadores tipo PEM para el almacenamiento de energía renovable en sistemas integrados a la red eléctrica nacional, con los que se aprovecharía su rápida velocidad de respuesta, menor a un segundo.

2. Celdas de combustible tipo PEM para integrarse en sistemas de almacenamiento-consumo de hidrógeno verde para la mitigación de los problemas de variabilidad de las fuentes renovables como la energía solar o eólica. También podrían implementarse en sistemas de respaldo de alta confiabilidad para procesos críticos, como servidores, torres de telecomunicación e infraestructura estratégica.
3. Baterías de flujo, las cuales, en sus distintas variantes, son una alternativa de almacenamiento de energía de fuentes intermitentes como la solar y la eólica donde los sistemas de hidrógeno resultarán poco convenientes por motivos técnicos o económicos. En especial, las baterías de flujo por compuestos orgánicos y de electrodiálisis son tecnologías prometedoras en cuanto a sus ventajas ambientales y costos.
4. Sales fundidas, como tecnología alternativa a la fotovoltaica, la cual tiene amplio potencial en México para generación de energía renovable, disponible 24 horas al día.
5. Membranas de intercambio iónico, corazón tecnológico de electrolizadores, celdas de combustible, baterías de flujo y sistemas de refinación de sales de litio.

Dada la intención de acelerar el desarrollo de estas tecnologías para lograr productos nacionales terminados listos para su escalamiento, implementación y producción masiva, el Conahcyt trabaja en coordinación con centros de investigación e instituciones de educación superior para la elaboración de un proyecto multiinstitucional alineado con la agenda nacional.

CONSIDERACIONES FINALES

Este capítulo enfatiza la importancia del desarrollo y la integración de tecnologías alternativas de almacenamiento de energía (TAAE) en México para lograr un mayor impacto de las energías renovables y avanzar hacia la descarbonización del sistema eléctrico nacional. La adopción de tecnologías de almacenamiento es esencial para descarbonizar el sistema eléctrico y electrificar al 100% las comunidades rurales, lo cual traerá beneficios económicos y sociales significativos para el país.

Las TAAE en México se encuentran en diferentes niveles de madurez tecnológica, desde la investigación inicial hasta la disponibilidad comercial. Es crucial apoyar estas tecnologías para acelerar su desarrollo y escalamiento. La colaboración entre actores de la pentahélice (el gobierno, las empresas, la academia y la sociedad y su interacción con el ambiente) es fundamental para superar los desafíos tecnológicos y promover la implementación de TAAE.

Es importante considerar el ciclo de vida completo de estas tecnologías para minimizar los impactos ambientales, puesto que las TAAE emergentes son opciones más favorables en comparación con algunas baterías convencionales. De las TAAE emergentes el hidrógeno se destaca como un portador de energía prometedor, con potencial significativo para su producción, almacenamiento y uso en celdas de combustible, contribuyendo a una economía de energía más limpia.

En este sentido, la creación de una agenda nacional y una regulación adecuada son claves para avanzar en el desarrollo y la implementa-

ción de tecnologías de almacenamiento de energía en México. Estas medidas contribuirán a cumplir las metas climáticas del país y fortalecerán el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La importancia de las tecnologías alternativas de almacenamiento de energía es crítica para el futuro energético de México, subrayando la necesidad de inversión, desarrollo tecnológico, colaboración multidisciplinaria y apoyo gubernamental para lograr una transición energética exitosa y sostenible.

REFERENCIAS

Abraham, K.M. (2020). How comparable are sodium-ion batteries to lithium-ion counterparts? *ACS Energy Letters*, 5(11), 3544. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02181

Alcaraz-Espinoza, J.J. y de Oliveira, H.P. (2022). Flexible and wearable supercapacitors: Constitutive aspects and future perspectives. En L. F. Cabezas (ed.). *Encyclopedia of energy storage*. Oxford Elsevier, 351.

Apostolou, D. y Xydis, G. (2019). A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109292. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109292

Armiño, C. A. (2019). *Acis-almacenamiento de energía*. https://acis.org.ar/2019/03/10/almacenamiento-de-energia/

Atta, M.M. y Fahim, R.A. (2021). Flexible and wearable supercapacitors: A short review. *Journal of Energy Storage*, *44*(B), 103475. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103475

Barchasz, C., Molton, F., Duboc, C., Leprêtre, J.-C., Patoux, S. y Alloin, F. (2012). Lithium/sulfur cell discharge mechanism: An original approach for intermediate species identification. *Analytical Chemistry, 84*(9), 3973. https://doi.org/10.1021/ac2032244

Bauer, T., Odenthal, C. y Bonk, A. (2021). Molten salt storage for power generation. *Chemie Ingenieur Technik, 93*(4), 534. https://doi.org/10.1002/cite.202000137

Bhargav, A., He, J., Gupta, A. y Manthiram, A. (2020). Lithium-sulfur batteries: Attaining the critical metrics. *Joule*, *4*(2), 285. https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.01.001

Blain, L. (2020). Tests show why quantumscape solid-state battery has serious backing. https://newatlas.com/energy/quantumscape-solid-state-battery/

Castelvecchi, D. (2021). Electric cars and batteries: How will the world produce enough? *Nature*, 596, 336. https://doi.org/10.1038/d41586-021-02222-1.

Chemicon (2024). *Basic knowledge on supercapacitors*. https://www.chemi-con.co.jp/en/products/edlc/knowledge.html.

Cheng, L., Assary, R.S., Qu, X., Jain, A., Ong, S.P., Rajput, N.N., Persson, K. y Curtiss, L.A. (2015). Accelerating electrolyte discovery for energy storage with high-throughput screening. *The Journal of Physical Chemistry Letters, 6*(2), 283. https://doi.org/10.1021/jz502319n

Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C. (CICY) (2021). *CICY desarrolla prototipos para aprovechar el hidrógeno en la producción y almacenamiento de energía*. https://www.cicy.mx/noticias-y-eventos/boletin-20-cicy-desarrolla-prototipos-para-aprovechar-el-hidrogeno-en-la-produccion-y-almacenamiento-de-energia.

Crownhart, C. (2023). Estado sólido o iones de sodio: Así es la nueva generación de baterías. https://www.technologyreview.es/s/15013/estado-solido-o-iones-de-sodio-asi-es-la-nueva-generacion-de-baterias.

Daniel, M., Byron, N.P. y Krowne, C.M. (2024). Harnessing redox flow batteries for industrial applications: Opportunities and future directions. *Journal of Power Sources*, 591, 233889. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233889

DeCourt, B. (2013). *Electricity storage Factbook*. Schlumberger - SBC Energy Institute https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/

Fang, R., Zhao, S., Sun, Z., Wang, D.-W., Cheng, H.-M. y Li, F. (2017). More reliable lithium-sulfur batteries: Status, solutions and prospects. *Advanced Materials*, *29*(48), 1606823. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.201606823

Fang, W., Pan, S., Zhang, F., Zhao, Y., Zhang, H. y Zhang, S. (2024). A three-dimensional flow-electrochemistry coupling model for optimizing the channel

configuration of lithium slurry redox flow battery. *Chemical Engineering Journal*, 485, 149572. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149572

Flores Hernández, J.R. y Cano Castillo, U. (2018). *Desarrollo tecnológico para generación de hidrógeno renovable en el* INEEL. https://transicionenergetica.ineel.mx/Revista.mvc/CD1n1v3.

Fornaro, P.O. (2023). *Desarrollo de metodologías de estimación para sistemas de almacenamiento de energía no convencionales en topologías híbridas*. Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería.

Fortune Business Insights (2023). *Metals and minerals, market research report-lithium market size*. https://www.fortunebusinessinsights.com/lithium-market-104052

Fortune Business Insights (2024). *U.S. Supercapacitor market size, share & covid-19 impact analysis*. https://www.fortunebusinessinsights.com/u-s-supercapacitor-market-106291

Guney, M.S. y Tepe, Y. (2017). Classification and assessment of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *75*, 1187. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102

He, M., Liu, S., Wu, J. y Zhu, J. (2024). Review of cathode materials for sodium-ion batteries. *Progress in Solid State Chemistry*, *74*, 100452. https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2024.100452

Hinicio (2022). *Experts building the hydrogen future, now*. https://hinicio.com/

Hou, Z., Chen, X., Liu, J., Huang, Z., Chen, Y., Zhou, M., Liu, W., Zhou, H. y (2024). Towards a high efficiency and low-cost aqueous redox flow battery: A short review. *Journal of Power Sources*, *601*, 234242. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234242

International Energy Agency (IEA) (2023). Electrolysers. https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2020). *Resumen ejecutivo para tomadores de decisiones*. Semarnat, INECC, Danish Energy Agency.

Ji, X., Lee, K. T. y Nazar L. F. (20099). A highly ordered nanostructured carbon–sulphur cathode for lithium–sulphur batteries. *Nature Materials*, *8*(6), 500. https://doi.org/10.1038/nmat2460

Khor, A., Leung, P., Mohamed, M.R., Flox, C., Xu, Q., An, L., Wills, R.G.A., Morante, J.R. y Shah, A.A. (2018). Review of zinc-based hybrid flow batteries: From fundamentals to applications. *Materials Today Energy, 8*, 80-108. https://doi.org/10.1016/j.mtener.2017.12.012

Li, G., Chen, Z. y Lu, J. (2018). Lithium-sulfur batteries for commercial applications. *Chem*, *4*(1), 3-7.

Li, Z., Jiang, T., Ali, M., Wu, C. y Chen, W. (2022). Recent progress in organic species for redox flow batteries. *Energy Storage Materials*, 50, 105-138. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.04.038

Liu, Z., Fu, W., Payzant, E.A., Yu, X., Wu, Z., Dudney, N.J., Kiggans, J., Hong, K., Rondinone, A.J. y Liang, C. (2013). Anomalous high ionic conductivity of nanoporous β-li3ps4: *Journal of the American Chemical Society, 135*(3), 975. https://doi.org/10.1021/ja3110895

Liu, Z., Li, X., Zhang, H., Huang, K. y Yu, Y. (2024). Are solid-state batteries absolutely more environmentally friendly compared to traditional batteries-analyzing from the footprint family viewpoint. *Journal of Cleaner Production*, *447*, 141452. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141452

Luo, J., Hu, B., Hu, M., Zhao, Y. y Liu, T.L. (2019). Status and prospects of organic redox flow batteries toward sustainable energy storage. *ACS Energy Letters, 4*(9), 2220. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.9b01332

Martínez, I.O. (2020). *Cemie-Oceano. ¿Sabes cuál es la diferencia entre cambio climático y variabilidad climática?* https://www.facebook.com/CemieOceano/posts/2769760829972332/

Massucco, S., Pongiglione, P., Silvestro, F., Paolone, M. y Sossan, F. (2021) Siting and sizing of energy storage systems: Towards a unified approach for transmission and distribution system operators for reserve provision and grid support. *Electric Power Systems Research*, *190*, 106660. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106660

Matteucci, N.J., Mallia, C.T., Neyhouse, B.J., Majji, M.V. y Brushett, F.R. (2023). Toward electrochemical design principles of redox-mediated flow batteries. *Current Opinion in Electrochemistry, 42*, 101380. https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101380

Maxwell (2024). Maxwell technologies products- ultracapacitor products. https://maxwell.com/products/

Mayo del Río, C. (2017). *Estudio medioambiental de materiales y compuestos avanzados para centrales termosolares de receptor central de torre con almacenamiento térmico*. Universidad Complutense de Madrid.

Mayrén, A., Alcaraz-Espinoza, J.J., Hernández-Sánchez, A., González, I. y Ramos-Sánchez, G. (2024), Chitosan binders for sustainable lithium-sulfur batteries: Synergistic effects of mechanical and polysulfide trapping properties. *Electrochimica Acta*, *480*, 143917. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.143917

McKerracher, C., Izadi-Najafabadi, A., O'Donovan, A., Albanese, N., Soulopolous, N., Doherty, D., Boers, M., Fisher, R., Cantor, C. y Frith, J. (2020). Electric vehicle outlook 2020. *Bloomberg New Energy Finance 2020*. https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook-2020/.

Mekhilef, S., Saidur, R. y Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(1), 981. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020

Miller, H.A., Bouzek, K., Hnát, J., Loos, S., Bernäcker, C.I., Weissgärber, T.D.-I., Röntzsch, L. y Meier-Haack, J. (2020). Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: A review of recent developments in critical materials and operating conditions. *Sustainable Energy & Fuels*, *4*(5). doi 10.1039/C9SE01240K

Montaudon, D. (2023). *Almacenamiento de energía: La oportunidad de oro para México*. https://cuatro-cero.mx/noticias/almacenamiento-de-energia-la-oportunidad-de-oro-para-mexico/

Nasser, M., Megahed, T.F., Ookawara, S. y Hassan, H. (2022). A review of water electrolysis–based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(58), 86994. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y

Olabi, A.G., Abbas, Q., Al Makky, A. y Abdelkareem, M.A. (2022). Supercapacitors as next generation energy storage devices: Properties and applications: *Energy*, *248*, 123617. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123617

Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Al-Murisi, M., Shehata, N., Alami, A. H., Radwan, A., Wilberforce, T., Chae, K.-J. y Sayed, E. T. (2023). Recent progress in green ammonia: Production, applications, assessment; barriers, and its role in achieving the sustainable development goals. *Energy Conversion and Management*, *277*, 116594. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116594

Paksoy, H. (2013). Thermal energy storage today. *IEA-energy storage technology roadmap stakeholder engagement workshop*. Paris.

Portillo, G. (2024) Sales fundidas. https://www.renovablesverdes.com/bioclimatizador/.

Quantum-Scape (2020). *What are solid-state lithium-metal batteries?*https://www.youtube.com/watch?v=azACL3lLMo8&t=80s&ab_channel=QuantumScape.

Rana, M.M., Uddin, M., Sarkar, M.R., Meraj, S.T., Shafiullah, G.M., Muyeen, S.M., Islam, M.A. y Jamal, T. (2023). Applications of energy storage systems in power grids with and without renewable energy integration – A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, *68*, 107811. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107811

Reve (2020) *La termosolar de 50 MW supcon delingha de china alcanzó un alto rendimiento récord en febrero de 2020*. https://www.evwind.com/2020/02/28/la-termosolar-de-50-mw-supcon-delingha-de-china-alcanzo-un-alto-rendimiento-record-en-febrero-de-2020/

Rico Secades, M. (2011). Mayor centro de energía termosolar de Europa. https://manuelricosecades.blogspot.com/2011/10/mayor-centro-de-energia-termosolar-de.html.

Sazali, N., Wan Salleh, W. N., Jamaludin, A. S. y Mhd Razali, M. N. (2020). New perspectives on fuel cell technology: A brief review. *Membranes*, *10*(5), 99. https://doi.org/10.3390/membranes10050099

Seh, Z.W., Zhang, Q., Li, W., Zheng, G., Yao, H. y Cui, Y. (2013). Stable cycling of lithium sulfide cathodes through strong affinity with a bifunctional binder. *Chemical Science*, *4*(9), 3673. https://doi.org/10.1039/C3SC51476E

Service, R. F., (2018). *Advances in flow batteries promise cheap backup power*. https://www.science.org/doi/10.1126/science.362.6414.508

Sharaf, O. Z., Orhan, M. F., 2014, An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications: *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32*, 810-853. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012

Shiva Kumar, S. y Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by pem water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, *2*(3), 442. https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002

Sikiru, S., Oladosu, T. L., Amosa, T. I., Olutoki, J. O., Ansari, M. N. M., Abioye, K.J., Rehman, Z.U. y Soleimani, H. (2024). Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *56*, 1152-1182. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.186

Singh, V., Kim, S., Kang, J. y Byon, H.R. (2019). Aqueous organic redox flow batteries. *Nano Research*, *12*(9), 1988-2001. https://doi.org/10.1007/s12274-019-2355-2

Solorza-Feria, O., Ellmer, K., Giersig, M. y Alonso-Vante, N. (1994). Novel low-temperature synthesis of semiconducting transition metal chalcogenide electrocatalyst for multielectron charge transfer: Molecular oxygen reduction. *Electrochimica Acta*, *39*(11), 1647-1653. https://doi.org/10.1016/0013-4686(94)85149-2

Srinivasan, V. (2008). Batteries for vehicular applications. *AIP Conference Proceedings*, *1044*(1), 283-296. https://doi.org/10.1063/1.2993726

Tabor, D.P. (2018). Approaching saturation limits. *Nature Energy*, *3*(6), 455-456. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0169-1

Torki, J., Joubert, C. y Sari, A. (2023). Electrolytic capacitor: Properties and operation. *Journal of Energy Storage*, *58*, 106330. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106330

Van, L. P., Chi, K. D. y Duc, T. N. (2023). Review of hydrogen technologies based microgrid: Energy management systems, challenges and future recommendations. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*(38), 14127-14148. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.345

Vinco, J. H., Domingos, A. E. E. d. C., Espinosa, D. C. R., Tenório, J. A.S. y Baltazar, M.d.P.G. (2021). Unfolding the vanadium redox flow batteries: An indeep

perspective on its components and current operation challenges. *Journal of Energy Storage*, *43*, 103180. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103180

Wang, H., Pourmousavi, S. A., Soong, W. L., Zhang, X. y Ertugrul, N. (2023). Battery and energy management system for vanadium redox flow battery: A critical review and recommendations. *Journal of Energy Storage*, *58*, 106384. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106384

Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K.S., Wang, Z. y Adroher, X. C. (2020). Materials, technological status, and fundamentals of pem fuel cells – A review. *Materials Today*, *32*, 178-203. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005

Waseem, M., Amir, M., Lakshmi, G.S., Harivardhagini, S. y Ahmad, M. (2023). Fuel cell-based hybrid electric vehicles: An integrated review of current status, key challenges, recommended policies, and future prospects. *Green Energy and Intelligent Transportation*, *2*(6), 100121. https://doi.org/10.1016/j.geits.2023.100121

Wu, Y.-t., Li, Y., Ren, N. y Ma, C.-f. (2017). Improving the thermal properties of nano3-kno3 for concentrating solar power by adding additives. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *160*, 263-268. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.013

Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A. y Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. C*ommunications Materials*, *1*(1), 99. https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x

Yadlapalli, R. T., Alla, R. R., Kandipati, R. y Kotapati, A. (2022). Super capacitors for energy storage: Progress, applications and challenges. *Journal of Energy Storage*, *49*, 104194. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104194

Yan, Z., Wycisk, R.J., Metlay, A.S., Xiao, L., Yoon, Y., Pintauro, P.N. y Mallouk, T.E. (2021). High-voltage aqueous redox flow batteries enabled by catalyzed water dissociation and acid–base neutralization in bipolar membranes. *ACS Central Science*, *7*(6), 1028-1035. https://doi.org/10.1021/acscentsci.1c00217

Yuan, Z., Peng, H.-J., Hou, T.-Z., Huang, J.-Q., Chen, C.-M., Wang, D.-W., Cheng, X.-B., Wei, F. y Zhang, Q. (2016). Powering lithium–sulfur battery performance by propelling polysulfide redox at sulfiphilic hosts. *Nano Letters*, *16*(1), 519-527. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04166

Zainal, B.S., Ker, P.J., Mohamed, H., Ong, H.C., Fattah, I.M.R., Rahman, S.M.A., Nghiem, L.D. y Mahlia, T.M.I. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189*(A), 113941. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941

Zarco, J. (2023). *Electromovilidad y la nueva propuesta del* INEEL. https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/01/05/electromovilidad-y-la-nueva-propuesta-del-ineel/.

6. Capacidades en materia de semiconductores de los Centros Públicos del Conahcyt

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos semiconductores son el fundamento de los sistemas electrónicos modernos utilizados en todas las actividades del ser humano, algunos ejemplos son: la telefonía, los sistemas médicos, automotrices y la computación. La crisis de la pandemia causada por la covid-19 trajo consigo una caída en la fabricación de circuitos integrados, popularmente conocidos como *chips*, para todas las aplicaciones, deteniendo los procesos de la industria y encareciendo los sistemas electrónicos, además de mostrar la dependencia de la sociedad mundial de estos insumos. Para México, la crisis planteó una oportunidad para fortalecer la articulación de capacidades nacionales en investigación, desarrollo tecnológico e innovación que el Conahcyt ha impulsado como política sustantiva de los Centros Públicos (CP) impulsando proyectos enfocados a la atención de problemas nacionales a través de tecnologías estratégicas.

La experiencia de los Centros Públicos que abarca desde el desarrollo de nuevos materiales, dispositivos semiconductores y sistemas electrónicos integrados, permitirá hacer frente al reto de la fabricación de sensores y actuadores inteligentes para las aplicaciones que el país requiera. Es importante mencionar que actualmente la competencia industrial

de semiconductores está enfocada en los sectores de microprocesadores para computación, memorias y microprocesadores gráficos. En esos sectores es difícil competir por los altos costos de inversión, que son del orden de decenas de miles de millones de dólares, sin embargo, existen otros sectores en semiconductores que representan un nicho de alto potencial para México. Ese es el caso de los sensores donde México cuenta con décadas de experiencia en investigación y desarrollo de materiales y dispositivos semiconductores.

Específicamente dentro del ámbito de los sensores, México, por la experiencia a nivel de investigación y desarrollo tecnológico de cerca de 40 años en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y la posterior incorporación del Cinvestav-Guadalajara, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (Cidesi), la Universidad Veracruzana (UV) y otros, tiene posibilidades de investigar, desarrollar tecnología y transferirla al sector industrial en el diseño de circuitos integrados, desarrollo de módulos de fabricación de sensores inteligentes y encapsulamiento híbrido tridimensional de sensores para uso en entornos biológicos, químicos o físicos, con aplicación en instrumentos médicos, instrumentos científicos, y sistemas para el medio ambiente.

La fabricación de estos componentes actualmente se concentra en países asiáticos, aproximadamente en un 70% (Arjun Kharpal, 2021). Las principales industrias afectadas por el desabasto a nivel mundial fueron: automotriz, computación y comunicaciones. En México, por ejemplo, la afectación impactó directamente en la fabricación de ventiladores mecánicos de emergencia Ehécatl-4T y Gatsi, cuyo desarrollo coordinado por el Conahcyt fue realizado por Centros Públicos y empresas mexicanas. Ante el alza en la demanda de circuitos integrados, sensores, motores, etc., las solicitudes de insumos realizadas por México pasaron a lista de espera de las proveedurías mundiales.

La experiencia en la fabricación de los ventiladores en México y países emergentes, así como la dependencia de sensores y circuitos integrados, se traduce en retos para la atención de las necesidades de la población y del desarrollo nacional en áreas estratégicas como el desarrollo de dispositivos médicos. Pero también se ven afectados desarrollos importantes en diseño de nuevas tecnologías para la salud; conversión, almacenamiento y control de energía, electromovilidad, monitoreo de regiones de emergencia ambiental y ciudades inteligentes, entre muchas otras aplicaciones. En este sentido la crisis que atravesó México es una oportunidad para impulsar la soberanía científica y la independencia tecnológica en áreas críticas para el Estado mexicano, como investigación, desarrollo tecnológico e innovación en sensores y actuadores inteligentes para aplicaciones en salud, energía y seguridad humana y ambiental.

CADENA DE VALOR DE LOS SEMICONDUCTORES

De manera general, la cadena global de valor de los semiconductores tiene tres eslabones centrales: *1*) diseño, *2*) fabricación del lado frontal (*frontend*), y *3*) ensamblado y pruebas del interior (*backend*), como se aprecia en la figura 1. En la primera fase se diseñan los circuitos que luego son fabricados en una tecnología de procesamiento de obleas. Esta fase conlleva el mayor gasto en investigación y desarrollo (I+D) del total de la cadena. En la producción, se busca que el diseño sea fabricado a costos y tiempos razonables. En esta etapa, las inversiones en maquinaria suelen durar hasta cinco años para la producción de un chip de frontera, hasta que aparezca un nuevo estándar en la industria. Cabe mencionar que las instalaciones de fabricación son altamente costosas. En la fase final, los chips son caracterizados y probados masivamente y empacados para ser entregados a las empresas que los ensamblan en el producto final (Filippo et al., 2022a).

Figura 1. La cadena global de valor de los semiconductores



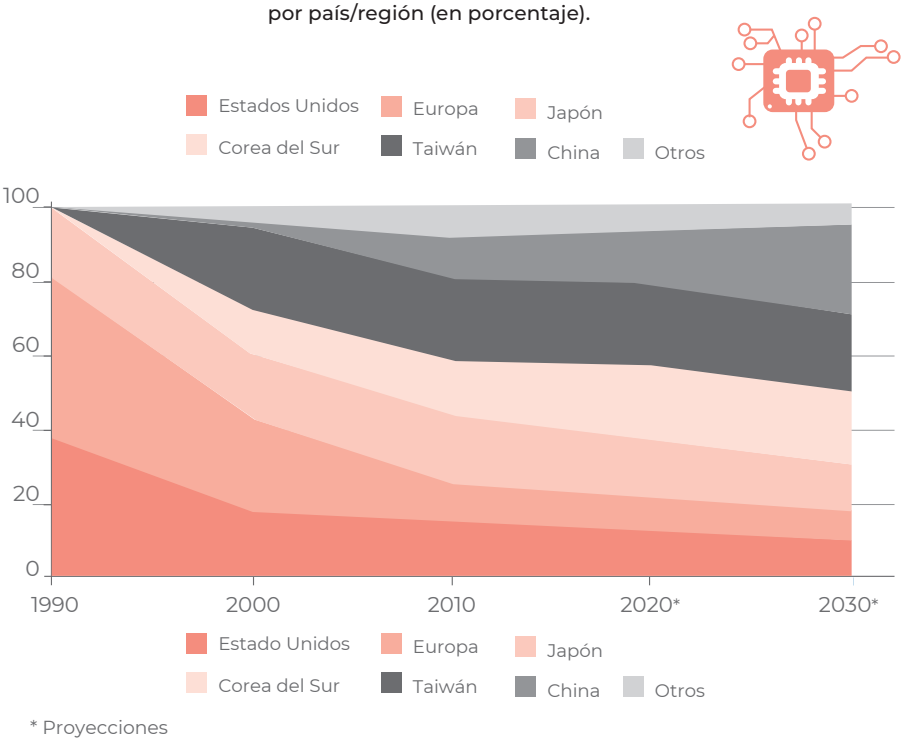
Fuente: Filippo, 2022.

Aunque los eslabones de la cadena concentran sus actividades en pocos países del mundo, es una cadena altamente globalizada, por lo que ningún país tiene todas sus actividades dentro de su territorio (Filippo et al., 2022a).

A nivel global, la fabricación de semiconductores está concentrada en Asia (figura 2). Entre los países industrializados más importantes que fabrican microchips se encuentran los Estados Unidos, Corea del Sur, Japón y

Taiwán, siendo este último el mayor productor de microprocesadores, con un 92% de la fabricación mundial. Cuenta, además, con las mejores tecnologías, un ambiente controlado de calidad y personal altamente calificado para producir microchips con tecnología de siete nanómetros, que es el punto de inflexión actual en la industria (Alviar Morales, 2022).

Figura 2. Distribución de la producción mundial de semiconductores por país/región (en porcentaje).



* Proyecciones

Nota: 2020 y 2030 son estimaciones (*).
Fuente: Statista, 2021.

La concentración en la industria se traduce en pocas empresas que producen y atienden la demanda de semiconductores, provocando alto poder de negociación; asimismo, la competencia y alta inversión que

requiere el mercado, por la complejidad de sus procesos, imposibilitan la entrada a empresas de menor tamaño, pues la producción de un microchip tarda de dos a tres meses, se lleva a cabo en fábricas especializadas que funcionan las 24 horas del día, cada día de la semana, cuyos procesos tienen altos costos resultado de las tecnologías especializadas, cuartos limpios e insumos, además de la variabilidad en los precios de estos últimos.

Los materiales semiconductores más usados en la industria de chips incluyen el silicio, germanio, boro, galio y fósforo, entre otros elementos más, que pueden sumar cerca de 50 de la tabla periódica. En el caso del silicio, China es productora del 70% a nivel mundial, alcanzando hasta 5.4 millones de toneladas métricas. El segundo país de mayor producción es Rusia con el 10 % de la producción total de China, seguida por Brasil, Noruega y los Estados Unidos (Statista, 2022). Desde los países productores, el silicio ya modificado se exporta para su posterior transformación en los Estados Unidos y Europa, o se distribuye principalmente en países asiáticos. Así, la cadena de suministro de esta industria se caracteriza por ser compleja, concentrada y con grandes barreras de entrada (García-Perrote Rodríguez, M., 2022).

De manera paralela, tanto los Estados Unidos como Europa, tratan de acercar a sus respectivos territorios las principales cadenas de suministro y reducir la dependencia de otros países, especialmente de los rivales geopolíticos (Casillas, 2021). En este contexto, tanto los Estados Unidos como Europa han emprendido acciones para mejorar su posicionamiento en la producción de semiconductores. En febrero de 2022, la Comisión Europea propuso la Ley de Chips acompañada de una serie de medidas, con las que movilizará más de 43 000 millones de euros de inversiones públicas y privadas, para duplicar su cuota de mercado actual hasta el 20% en 2030 (Comisión Europea, 2022). De manera similar, en agosto de 2022, Estados Unidos promulgó la Ley de Chips y Ciencia, con la que se movilizarán 280 000 millones de dólares, de los cuales 52 000 millones se utilizarán para impulsar la fabricación de

semiconductores en el país y reducir la dependencia de suministros del extranjero (Expansión, agosto 2022).

En el caso de México, aunque el país tiene participación en la cadena de semiconductores y cuenta con una posición favorable por su relación con los Estados Unidos, es un importador neto de semiconductores. Por otra parte, aunque el país no cuenta con capacidad producción tipo *frontend*, existe la oportunidad de proveer bienes y servicios conexos a Estados Unidos, país que sí cuenta con esta capacidad. Así, México podría llegar a ser considerado como un nuevo polo de *backend*, a fin de absorber el crecimiento de la producción *frontend* de los Estados Unidos (Filippo et al., 2022b).

Es necesario comentar que en México también existe actividad en diseño de circuitos integrados, no sólo en el ámbito académico (INAOE, Cinvestav, IPN, UV), sino también en el industrial como Intel, Big Bang y otras empresas que igualmente están observando oportunidad en ese nicho. Por lo tanto, se recomienda buscar la posibilidad de entrar en la producción tipo *frontend*.

Cabe destacar que, actualmente, los Estados Unidos ya han tenido un acercamiento con México para su participación en un proyecto que busca trasladar la producción de semiconductores de Asia a Norteamérica, en el marco de las medidas que acompañan a la Ley de Chips y Ciencia (Los Ángeles Times, 2022). Como parte de este proyecto, el primer punto del proceso de construcción del chip se realizaría en los Estados Unidos, mientras que en México se haría la programación y distribución a todo el continente (Expansión, septiembre 2022).

A continuación, se mencionan algunos de los retos identificados con la cadena de valor de la industria de semiconductores en el contexto de México (Filippo et al., 2022b):

- Aunque los esfuerzos de las empresas vinculadas al sector (por ejemplo: IBM o Intel) para generar talento en el área de las ingenierías son importantes, no se consideran suficientes.

- Por el momento no hay suficientes empresas potenciales proveedoras y hay dificultad para obtener ciertas certificaciones, requisito base para el desarrollo como proveedor. Además, hay fallas de información, es decir, desconocimiento de lo que implica la cadena de semiconductores por parte del entramado productivo.
- El proceso de semiconductores, específicamente el *frontend*, demanda grandes cantidades de agua limpia y energía, por lo que las empresas de la industria tienden a generar gases de efecto invernadero de manera importante.
- La investigación precompetitiva en institutos y universidades puede tardar más de diez años antes de convertirse en aplicaciones comerciales, por lo que los gobiernos de otros países suelen dar incentivos importantes para esta actividad.

POTENCIAL DE MERCADO NACIONAL E INTERNACIONAL, PRINCIPALES EMPRESAS DESARROLLADORAS Y APLICACIONES

MERCADO INTERNACIONAL DE SEMICONDUCTORES

De acuerdo con información de McKinsey, el mercado de semiconductores ha experimentado un gran auge, con un crecimiento en las ventas del 20% hasta alcanzar unos $600 000 millones de dólares en 2021. Según esta fuente, se prevé que la industria alcance un billón de dólares en 2030, impulsado principalmente por los sectores automotriz, computación y almacenamiento de datos (McKinsey y Company, 2022).

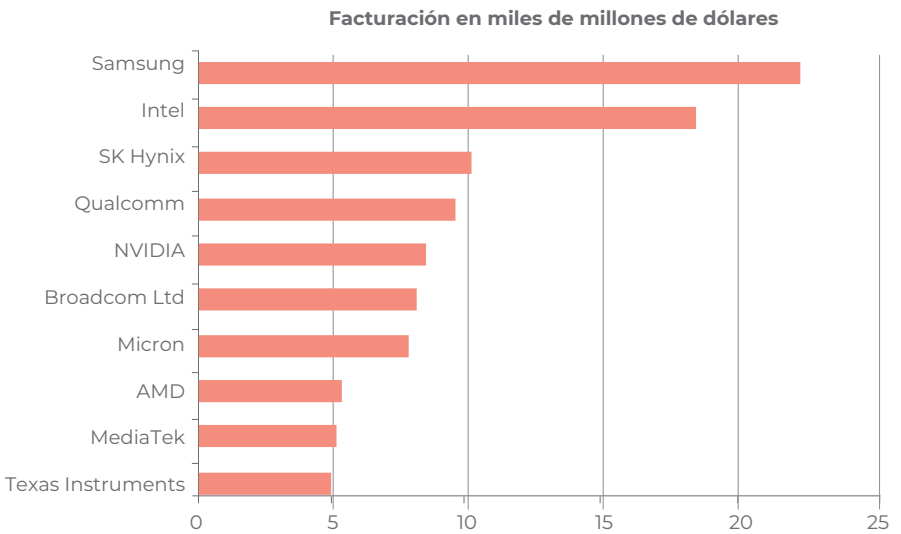
Las mayores empresas fabricantes de semiconductores (figura 3) se encuentran en el continente asiático. Taiwán, Corea del Sur y China

aportan el 87% de la producción global (63%, 18% y 6% respectivamente). La empresa Taiwán Semiconductor Manufacturing Company es líder (TSMC) al concentrar el 54% de la producción mundial (Dueñez, 2022).

También se identifican empresas, principalmente de los Estados Unidos y Corea del Sur, entre los mayores vendedores de semiconductores del mundo como: Intel, Samsung Electronics, SK Hynix, Micron, Qualcomm, Broadcom y Texas Instruments, entre otros (Statista, 2021).

A continuación, se presentan datos sobre el tamaño de mercado y actores principales que participan en los sectores de sensores semiconductores para la industria automotriz, sensores químicos y biológicos en el sector salud y sensores químicos y biológicos para el monitoreo de variables ambientales en el contexto internacional.

Figura 3. La clasificación de los 10 vendedores de semiconductores líderes a nivel mundial en el primer trimestre de 2022



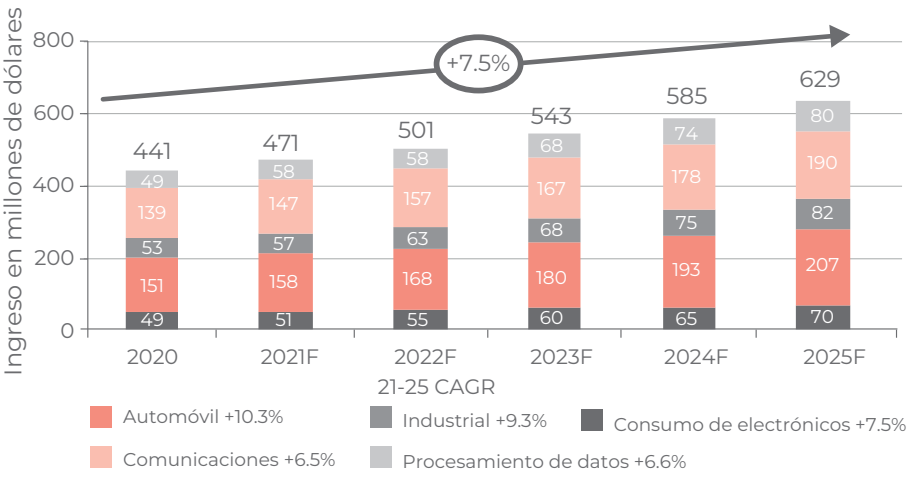
Fuente: Statista, 2022.

Sensores semiconductores para la industria automotriz a nivel global

El mercado de sensores automotrices crecerá a una tasa anual compuesta del 6.3% durante el periodo de pronóstico 2021-2028, lo que significa que el valor de mercado alcanzaría los $15600 mil millones dólares (mdd) para 2028 (GlobeNewsWire, 2022).

Se estima que durante 2021, los sensores para la industria automotriz constituyeron un mercado global de 15200 mdd y se prevé que crezca a una tasa promedio del 7.7% anual hasta alcanzar los 22000 mdd, según la consultora BBC Research. Mercados emergentes como China e India son una oportunidad para las aplicaciones de sensores, indica el reporte de BBC Research, por su alta demanda de sensores asociada a un aumento en la fabricación de vehículos a partir de 2004. Los países donde los vehículos tienen más sensores son los Estados Unidos, Japón y Europa (Torres, 2013).

Figura 4. Tamaño del mercado de la industria global de semiconductores



Fuente: Deloitte (2021), con datos de Mordor Intelligence.

El mercado global de semiconductores para automóviles se valoró en 34 410 mdd en 2020 y se espera que alcance los 101 280 mdd en 2016, registrando una tasa de crecimiento anual compuesta de aproximadamente el 17.34% durante el periodo de pronóstico de 2021-2026 (Mordor Intelligence, 2021).

Se espera que el tamaño del mercado de la industria mundial de semiconductores alcance los 630 000 mdd para 2025 (figura 4). El pronóstico ha demostrado que la demanda de chips de la industria automotriz, que se espera que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 10% en los próximos cinco años, será el principal impulsor de la demanda de la industria (Deloitte, 2021).

Sensores químicos y biológicos en el sector salud

Los biosensores constituyen una tecnología en ascenso en el mundo. De acuerdo con datos de Markets and Markets[1], el mercado de biosensores fue valuado alrededor de 16 000 mdd en 2016. Se estima que llegará a los 27 000 mdd en 2022. Los biosensores médicos comprenden el 66% de ese mercado. La demanda de estos dispositivos aumentará en los próximos años, por la creciente prevalencia de enfermedades como la diabetes, por la necesidad de contar con dispositivos que monitoreen los niveles de glucosa en la sangre. Los Estados Unidos son el principal mercado de biosensores, producto de una cultura de rápida adopción de productos tecnológicamente avanzados por parte de médicos y científicos (Oliveira, 2017).

En un reporte más reciente de Markets and Markets se menciona que, en 2021, el mercado de biosensores fue valorado en 25 500 mdd y se prevé que alcance los 36 700 mmdd en 2026. Asimismo, se espera que crezca a un CAGR del 7.5% de 2021 a 2026. (Markets and Markets, SE3097, 2021).

[1] Empresa estadounidense de sondeos y consultoría del área de tecnología de la información.

En el informe "Mercado de nanobiosensores: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2022-2027)" de Mordor Intelligence, adicionalmente se ha prospectado que el mercado de nano-biosensores registre un CAGR del 10% durante el periodo de pronóstico de 2021-2026. Se espera que el segmento de atención médica represente una parte significativa de este mercado durante el periodo de pronóstico. La expansión en estos segmentos se puede atribuir al uso de nanosensores en diagnósticos médicos para detectar diversos tipos de cáncer o como sensores transmitidos por la sangre. Los sectores de la salud y la biomedicina son el mercado inicial más grande para los nanobiosensores debido a la creciente necesidad de sistemas de detección de diagnóstico rápidos, compactos, precisos y portátiles.

Principales actores de la iniciativa privada de nivel I y II:

Mercado de biosensores

- Abbott Laboratories
- Johnson & Johnson
- Bayer Healthcare
- Roche (Suiza)
- Medtronic (Irlanda)
- Bio-Red Laboratories Inc
- DuPont

Mercado de nanobiosensores

- Acon Laboratories, Inc
- Abbott Point of Care, Inc
- Aglient Technologies Inc
- Nanowear, inc
- AerBetic

Mercado de sensores biomédicos (Miyashiro Samuel)

- GE Healthcare
- Honeywell
- STMicroelectronics
- Medtronic
- Texas Instruments
- NXP Semiconductor

Sensores químicos y biológicos para el monitoreo de variables ambientales

El mercado de sensores ambientales se valoró en 1 400 mdd en 2020 y se espera que registre una tasa de crecimiento anual compuesta superior al 9.25% durante el periodo de pronóstico 2021-2026; para alcanzar un valor de 2 200 mdd en 2026, como es presentado en el reporte de Mordor Intelligence "Mercado de sensores ambientales: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2022-2027)", figura 5.

Líderes del mercado, de la iniciativa privada, de sensores ambientales:

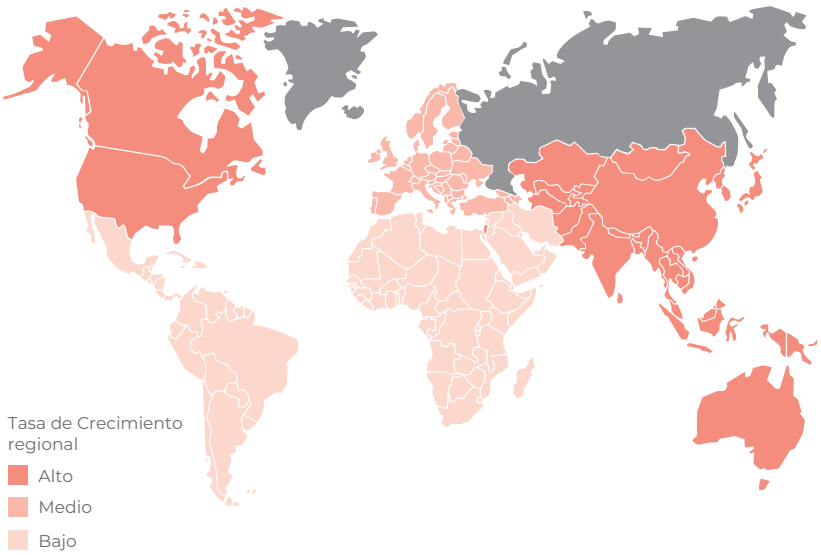
- AMS AG
- Powelectrics Limited.
- Texas Instruments Inc.
- Omron Corporation.
- Honeywell International.
- Bosch Sensortec.
- Eko Instruments B.V.

MERCADO DE SEMICONDUCTORES EN MÉXICO Y AMÉRICA LATINA

A pesar del amplio abanico de industrias en los sectores de electrónica, electrodomésticos, automotriz, aeroespacial y de telecomunicaciones que

se encuentran en México, aún no se ha desarrollado con la misma fuerza la cadena de valor de semiconductores, pues de acuerdo con un estudio del Banco Interamericano de Desarrollo (Filippo et al., 2022b), en México se identifican sólo cuatro empresas que participan en la cadena global de valor de semiconductores: Intel en Guadalajara realiza actividades de diseño, Skyworks en Mexicali, Texas Instruments en Aguascalientes e Infineon en Tijuana, que realiza actividades tipo *backend*.

Figura 5. Crecimiento regional del mercado en sensores ambientales (2019-2024)

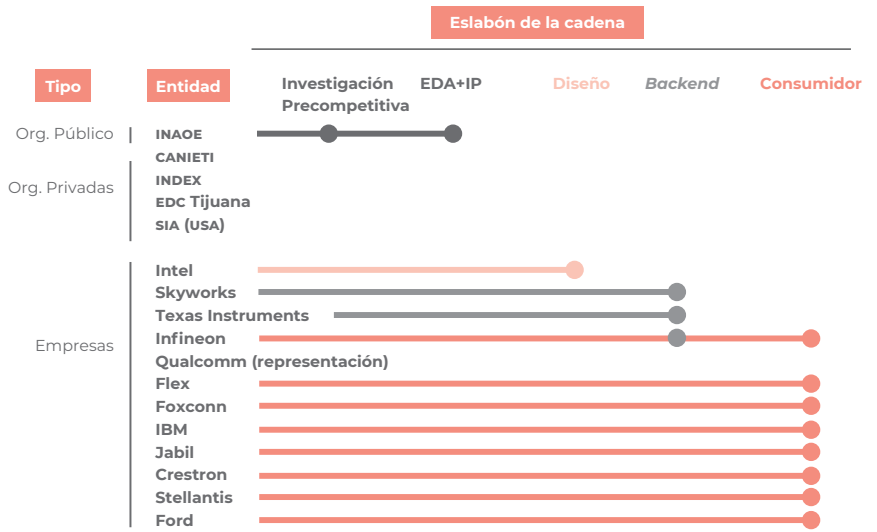


Fuente: Mordor Intelligence, 2022.

No obstante, se identifican 17 actores del sector que fueron entrevistados para ese mismo estudio, y que se ubican en algún eslabón de la cadena de valor de los semiconductores en México (figura 6). Como se puede observar, el INAOE, por ejemplo, realiza actividades de investigación, pero también brinda servicios tipo Electronic Design Automation

(EDA)[2] a empresas de la industria. Canieti y Tijuana EDC concentran empresas demandantes de semiconductores, mientras que INDEX y SIA son organizaciones estrechamente relacionadas con esta industria. Asimismo, empresas como Infineon, Qualcomm, Flex, Foxconn, IBM, Jabil, Crestron, Stellantis y Ford son grandes consumidores de semiconductores con presencia en México.

Figura 6. Actores y su ubicación en la cadena de semiconductores en México



Fuente: Filippo, 2022b.

Considerando que en México existe un ecosistema de fabricación de semiconductores en algunos eslabones de la cadena, se observa una oportunidad para acceder a un mercado potencial de 60 000 mdd de ensamble

[2] La automatización del diseño electrónico (EDA) es el uso de programas informáticos para diseñar, simular, verificar y fabricar sistemas electrónicos como circuitos integrados (IC), paquetes de IC y placas de circuito impreso (PCB).

de semiconductores que actualmente tiene lugar en Asia, pero que se podría trasladar a México (Cantera, 2022).

Se presentan datos sobre el tamaño de mercado y actores principales que participan en los sectores de sensores semiconductores para la industria automotriz en México, mientras que en el caso de los sensores químicos y biológicos para el monitoreo de variables ambientales se presentan datos a nivel de América Latina. Por el momento, no se tienen datos de mercado identificados para el caso específico de biosensores, sensores biomédicos o sensores biológicos en México.

Sensores semiconductores para la industria automotriz en México

Con base en el reporte de Mordor Intelligence "Mercado de sensores automotrices de México: por tipo de sensor (presión, temperatura, imagen, flujo, químico y gas, posición y proximidad), tecnología, industria, tendencias, pronóstico (2020-2025)", se espera que el mercado de sensores automotrices de México crezca a 330 millones de dólares para 2021 a una CAGR del 5.26% durante el periodo 2016-2021. El bajo costo, el tamaño compacto, la naturaleza ecológica y la capacidad de fabricación a granel son los impulsores clave que ayudan al crecimiento del mercado de sensores automotrices. El desarrollo de nuevas aplicaciones para tecnologías que utilizan nano y micro tecnología ayudará a que crezca el mercado de sensores automotrices en México.

Sensores químicos y biológicos para monitoreo de variables ambientales en América Latina

El reporte "Mercado de sensores químicos de América Latina: por tipo (electroquímico, óptico, catalítico por carretera) aplicación (médica, automotriz, industrial, manejo ambiental) geografía, tendencias" de

Mordor Intelligence, menciona que se espera que el mercado de sensores químicos de América Latina aumente a 1.89 millones para 2018 a un CAGR del 6.55% durante el periodo 2014-2020.

El crecimiento también se respaldará por la creciente propagación tecnológica y la fusión de productos de sensores químicos con aplicaciones, como médicas, automotrices y de fabricación, etc., los principales factores que impulsan el crecimiento del mercado de sensores químicos.

Líderes, de la iniciativa privada, de sensores químicos y biológicos en América Latina:

- General Electric (EE. UU.)
- Honeywell International Inc. (EE. UU.)
- Teledyne Technologies Incorporated (EE UU.)
- Siemens AG (Alemania).
- Emerson Electric Company (EE. UU.)

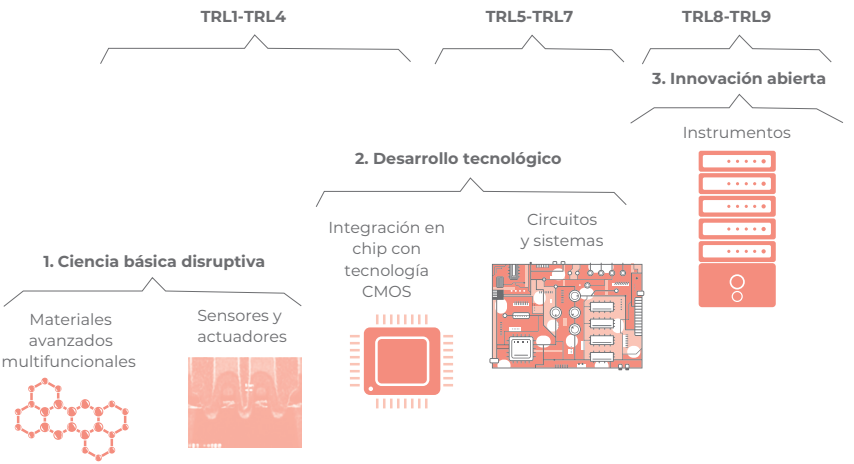
ARTICULACIÓN DE CAPACIDADES EN LOS CENTROS PÚBLICOS (CP): ISENSMEX

El proceso de fabricación de circuitos integrados requiere de infraestructura compleja para procesar dispositivos semiconductores, la articulación eficiente de capacidades nacionales con criterios de servicio público, rigor científico-tecnológico y ético permitirán al Estado mexicano contar con una línea de producción nacional de sensores de señales de naturaleza física, biológica o química, para la medición de la temperatura, radiación, presión, flujo, actividad bioquímica, antígenos, proteínas, bacterias, sustancias tóxicas, metales pesados, pH, humedad, entre otras, que después de ser procesadas se utilizan para activar una acción de monitoreo, control, o corrección.

Conahcyt actualmente coordina y apoya el fortalecimiento de una línea de desarrollo y fabricación de sensores en México mediante la articulación de capacidades nacionales desarrolladas en los CP: INAOE, CIDESI

y CICESE en alianza con instituciones de educación superior. La entidad articuladora llamada "Plataforma para el desarrollo y fabricación de sensores y actuadores inteligentes aplicados en energía, salud y seguridad: iSensMex", es infraestructura científica del Estado mexicano, única en Latinoamérica debido a que tendrá capacidades de diseño, modificación y compatibilidad de materiales semiconductores para la fabricación de cualquier tipo de sensores con las capacidades necesarias para desarrollar todas las etapas del proceso de fabricación de sistemas electrónicos (figura 7).

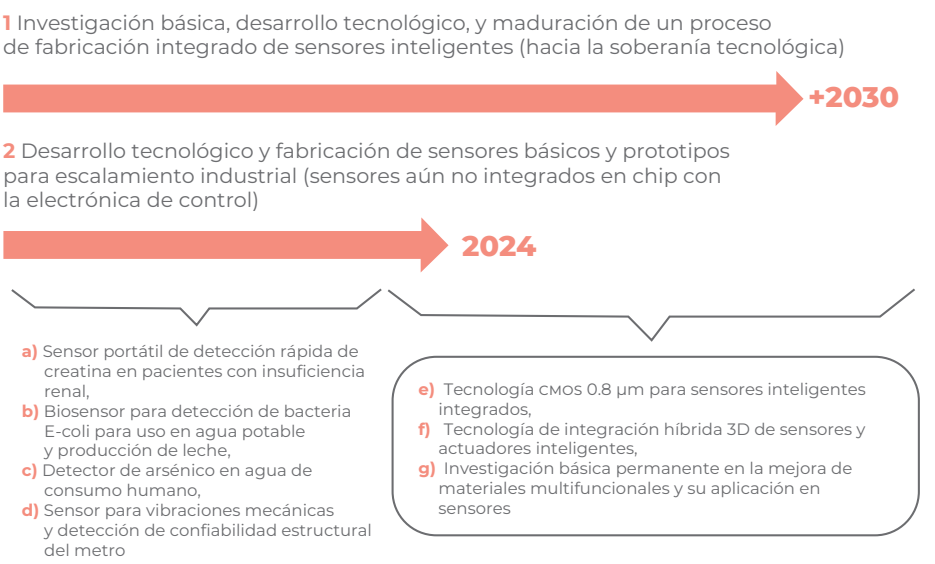
Figura 7. Circuito del proceso investigación, tecnología e innovación



Fuente: iSensMex, 2022.

iSensMex articula las capacidades de los CP e instituciones de educación superior, que van desde la investigación de nuevos materiales; fabricación de sensores y actuadores; y diseño de sistemas electrónicos inteligentes. Esta iniciativa de largo aliento considera en el mediano plazo el escalamiento industrial para la producción a nivel nacional y latinoamericano de este tipo de dispositivos y sistemas, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Proceso de desarrollo y maduración de la fabricación de sensores en iSensMex



Fuente: iSensMex, 2022.

En México, la capacidad académica en semiconductores se desarrolla en diversas instituciones que realizan enseñanza, principalmente en nivel de licenciatura. En cuanto a investigación científica se refiere, las capacidades en México se han consolidado durante más de 35 años, centrándose principalmente en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (Cidesi), el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Cimav), el Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro (Ciateq), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO). Adicionalmente se ha impulsado el desarrollo en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), el Cinvestav-Guadalajara, Cinvestav-México, el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICyT), la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), la Universidad

Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Universidad Veracruzana (UV) (iSensMex, 2022).

En infraestructura, en México existen un conjunto de cuartos limpios hasta clase* 10, en donde se pueden realizar procesos de fotolitografía; depósito de películas orgánicas e inorgánicas, su caracterización, tanto estructural como de propiedades de transporte y micro-maquinado de alta precisión. Las instituciones de la red de centros Conahcyt que cuentan con esta infraestructura son Cidesi, INAOE, CIO, Cideteq y Cimav. Esta red tiene gran capacidad científica y tecnológica para desarrollar técnicas de depósito de materiales nanoestrucutrados compatibles con la tecnología del silicio, como base para la fabricación de sensores de cualquier tipo (infrarrojo, magnéticos, presión, ópticos, UV, químicos, biológicos, celdas solares, etc.), circuitos integrados CMOS, dispositivos fotónicos, fluídicos, sistema microelectromecánicos y baterías. En la tabla 3 se muestran las capacidades de los cuartos limpios de centros de investigación Conahcyt.

El equipo necesario para todas las etapas del proceso de fabricación de sensores —desde la investigación de nuevos materiales, el diseño y fabricación de chips, el ensamblado y encapsulado de los circuitos, hasta las pruebas de confiabilidad y validación— no sería posible sin una estrategia de articulación sustantiva como iSensMex. Este proyecto surje de la coordinación virtuosa de capacidades humanas y tecnológicas enfocadas en poner la ciencia, la tecnología y la innovación al servicio del país. Su objetivo es brindar soluciones a los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces), desde los institutos de salud, dependencias y entidades púbicas, el sector privado y social.

* La *clase* se refiere a su clasificación por el número de partículas de tamaño menor o igual a 0.5 micras por pie cúbico. Por ejemplo, clase 10 significa 10 o menos partículas de 0.5 µm en un pie cúbico.

Tabla 1. Infraestructura de cuartos limpios de los CP para desarrollo de nuevos materiales y semiconductores

CPIS	CARACTERÍSTICAS	EQUIPAMIENTO PRINCIPAL	PRINCIPALES USOS
INAOE	Área limpia de 420 m^2 clase 10-100	· Removedor de fotoresinas Asher	
	Área de servicio 180 m^2 clase 1000	· Sistema de grabado en seco de óxidos	Fabricación de diferentes tipos de sensores (infrarrojo, magnéticos, ópticos, UV, químicos, biológicos, celdas solares, etc.)
		· Sistema de grabado en seco de metales	Fabricación de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)
	Proceso de fabricación nacional de circuitos integrados BiCMOS con dimensión mínima de 0.8 µm	· Sistema de depósito de metales por sputtering	Obtención, caracterización y aplicación de materiales nanoestructurados compatibles con la tecnología del silicio
		· Sistema de depósito de películas delgadas por e-beam	Desarrollo de dispositivos optoelectrónicos en base de silicio
		· Generador de patrones (1 µm de resolución)	
		· Sistema de mapeo · de resistividades	
		· Sistema medidor de dimensiones críticas	
		· Elipsómetro	
		· Sistema de medición · de espesores	
		· Sistema de grabado profundo por iones reactivos	
		· Sistema para procesos rápidos térmicos	
		· Fotoalineadora	
		· Sistema para depósito de capas atómicas	
		· Implantación iónica	

CPIS	CARACTERÍSTICAS	EQUIPAMIENTO PRINCIPAL	PRINCIPALES USOS
CIDETEQ	Área de 42 m^2 divididos en dos espacios más esclusa de cambiado	• Estación de fotolitografía (wetbench, generador de micropatrones, spinner, parrilla)	• Investigación, fabricación de sistemas microfluídicos
	Limpieza clase ISO 7, de acuerdo a la norma ISO 14644	• Sistema de depósito de películas delgadas por evaporación (e-beam) y sputtering	• Con electrodos metálicos depositados
		• Sistema de micromaquinado (fresado CNC) de alta precisión	• Separación de células
			• Para cultivo celular
			• Para biosensado
			• Para determinación de sexo en plantas
			• Fabricación de moldes para litografía suave
			• Fabricación de chips microfluídicos con diversas aplicaciones
CIO	Área 120 m^2 clase 10 000 (ISO 7)	• Fotolitografía • Películas delgadas • Fabricación y caracterización de baterías de litio tipo botón • Proceso químico – seco • Tratamientos térmicos y oxidación húmeda y seca • Procesos químico-húmedo • Inspección de muestras y medición de estructuras	• Desarrollo de dispositivos fotónicos, fluídicos, circuitos integrados, sistemas microelectromecánicos (MEMS) y electrónica flexible para dimensiones mayores a 10 µm

CPIS	CARACTERÍSTICAS	EQUIPAMIENTO PRINCIPAL	PRINCIPALES USOS
CIDESI	Área 360 m²	· Revelado	· Desarrollo de sensores y circuitos integrados para aplicaciones específicas (dimensiones de 5 µm), principalmente aplicaciones médicas e industriales
	cuarto limpio multi clase, 100 y 1000	· Ataque húmedo y limpieza · Grabado seco	
	División en 11 bahías, especializadas en un proceso de fabricación de dispositivos semiconductores	· Procesamiento térmico	
		· Depósito de películas por LPCVD y PECVD · Pulido químico – mecánico · Fotolitrografía	

Fuente: elaboración propia.

PROYECTO ISENSMEX, CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA NACIONAL

En el año 2021 el Conahcyt apoyó la propuesta "Plataforma para el desarrollo y fabricación de sensores y actuadores inteligentes aplicados en energía, salud, y seguridad – iSensMEX". Esta plataforma, llamada en adelante iSensMEX, inició con la participación de INAOE, Cimav, Cidesi, Ciateq, e InnovaBienestar (antes Comimsa), con el objetivo de integrar, de manera complementaria, las capacidades de laboratorios de investigación y desarrollo tecnológico, y del personal científico y tecnológico, para realizar investigación básica y desarrollo tecnológico desde nivel de materiales avanzados, dispositivos semiconductores, circuitos integrados, hasta sistemas.

Se busca investigar y desarrollar la tecnología de sensores biológicos, químicos o físicos, siempre que su fabricación sea compatible con la tecnología de circuitos integrados CMOS. Esto con la intención de hacer integración monolítica del sensor con su circuito de lectura y control, y con ello dotar al sensor con inteligencia en un sólo chip. Y cuando la

tecnología del sensor no sea compatible con la tecnología CMOS, entonces utilizar ensamble híbrido tridimensional.

Es pertinente mencionar que, desde la segunda mitad del año 2022, se está reorientando el esfuerzo para alinearlo a temas más urgentes. Entre los nuevos objetivos planteados está el coadyuvar en el Plan Sonora en el sector de energías sostenibles. Con el compromiso de crear esfuerzos enfocados para articular las iniciativas impulsadas por el Ejecutivo Federal del país.

Como resultado del proyecto se espera contar con una red de colaboraciones capaz de desarrollar soluciones reales, transitando hasta niveles de una madurez tecnológica avanzada en tan solo tres años y, a la vez, desarrollar una plataforma flexible de fabricación de microsensores, actuadores y circuitos integrados para desarrollos futuros.

La tecnología de fabricación de sensores y actuadores inteligentes viene aparejada de la creación de los llamados PDKS (*Process Design Kits*), que son módulos tecnológicos que describen el proceso de fabricación y definen las reglas para el diseño de los sensores. Los PDKS se pondrán a disposición de otros actores que lo necesiten para diseñar y fabricar sensores con especificaciones particulares, atendiendo de esta manera los objetivos de la innovación abierta que promueve el modelo de innovación mexicano.

En el horizonte hacia el 2030, cuando las prioridades nacionales lo demanden, se considera el escalamiento industrial para la producción a nivel nacional, latinoamericano y, posiblemente, a nivel global.

Por el momento se está determinando lograr que los sensores utilicen materiales que les permitan hacerse reusables y no desechables para reducir su impacto ambiental, principalmente en los casos del sensor de detección de la bacteria *E. coli*. Asimismo, los nuevos paquetes tecnológicos, buscarán encontrar aplicaciones en el desarrollo de sensores de utilidad para la generación de energía renovable de amplio alcance como la solar o tecnologías de bajo impacto como la electromovilidad.

POSIBILIDAD DE CREAR UNA FÁBRICA DE OBLEAS ELECTRÓNICAS EN MÉXICO

Las obleas electrónicas, generalmente de silicio cristalino como material base, son el substrato donde se fabrican dispositivos semiconductores, sensores, circuitos, sistemas y chips, pero también son el substrato usado para fabricar celdas solares. Algunos tipos de obleas también se utilizan en la creación de componentes ópticos, e incluso para para blindaje en aviones.

Las obleas pueden tener niveles de pureza desde el 99.999% hasta el 99.999999999%, y en general existen en cuatro tipos, las llamadas intrínsecas, las dopadas con fósforo o boro, las obleas epitaxiales, y las obleas SOI (*Silicon-On-Insulator*). Estas se fabrican con diámetros desde 4 hasta 12 pulgadas en producción hoy en día. A nivel exploratorio algunas empresas están trabajando ya con obleas de 18 pulgadas.

Las obleas que se usan para la fabricación de celdas solares pueden ser también utilizadas para la fabricación de algunos tipos de sensores y circuitos integrados que no requieren de alto rendimiento o geometrías muy pequeñas.

Actualmente, la producción de obleas del tipo SOI, que son las que mayoritariamente se usan para la fabricación de microprocesadores y chips de comunicaciones, está dominada en el 77% por la empresa francesa Soitec, seguido por Shin-Etsu Chemical Co. de Japón, GlobalWafers Co. Ltd de Taiwán, Sumco Corporation de Japón y Shanghai Simgui Technology Co. de China. Después viene otra lista grande de empresas pequeñas, que incluyen a países como Alemania y los Estados Unidos, por ejemplo, el mercado de obleas SOI para el año 2026 está estimado en 2300 mdd.

Otra porción de obleas incluye las que no son del tipo SOI y que son de diámetro distinto a las SOI de 300 mm o 450 mm. Aquí entran las de 200 circuitos, sensores, celdas solares, etc. Este sector es dominado por

empresas como Siltronic AG, MEMC Electronic Materials Inc, LG Siltronic, Advance Semiconductor Inc.

Durante 2022 las empresas fabricantes de obleas SEH y Sumco de Japón, Siltronic de Alemania, GlobalWafers de Taiwán, y SK Siltron de Corea del Sur, que cubren el 90% del mercado global de obleas no de SOI (aunque hacen algunas), han informado que estarán incrementando su producción hasta el año 2024.

Hay una empresa llamada Okmetic, de Finlandia –la cual ocupa el 7° lugar en el mundo–, que produce obleas para sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés), dispositivos de potencia y RF; y sensores, que está invirtiendo en obleas de 200 mm.

ESTRATEGIA, BENEFICIOS Y PROYECCIÓN A FUTURO

Si consideramos que México va a incursionar en la producción de energía limpia con celdas solares y va a instalar diferentes granjas solares en el país, entonces la oportunidad reside en crear una fábrica de obleas para celdas solares que satisfaga, en principio, el mercado nacional. Y debido a que ya se tiene la plataforma iSensMex para la investigación, desarrollo tecnológico e innovación en sensores inteligentes, lo más conveniente es instalar una fábrica de obleas que sirva con el doble propósito para uso en celdas solares y para un proceso de fabricación industrial de sensores, circuitos analógicos e interfaces. La tabla 4 ofrece una propuesta de trabajo a futuro.

Tabla 2. Trabajo futuro para el desarrollo de la producción de obleas para celdas solares y su articulación con sensores inteligentes

2025	2026	2030	2050
Selección de la tecnología de purificación de la sílice y construcción de la planta semi-piloto*	Validación de la tecnología a escala piloto, producción continua de polisilicio grado electrónico (EG-Si) a partir de silicio grado metalúrgico	Fabricación a escala industrial de EG-Si	Estabilización de la producción de EG-Si a partir de la capacidad de producción de celdas solares y sensores inteligentes manufacturados con monocristal de silicio
Selección del método para la producción de silicio monocristalino y preparación del mapa de ruta para construcción de la planta	Validación de la tecnología a escala piloto, producción continua de monocristal de silicio	Fabricación a escala industrial de monocristal de silicio	Comercialización estabilizada de obleas de silicio para diversas aplicaciones
Gestión de convenios entre industria, academia y gobierno para generar el flujo de suministros, capital humano y desarrollo de procesos con la finalidad de acelerar la planta de producción.			
Caracterización y selección de sílice** en función de la pureza necesaria para los procesos, en colaboración de productores nacionales	Validación de las técnicas desarrolladas para obtención de obleas	Integración de la tecnología de corte y pulido de obleas con las variantes para cada aplicación	
Selección del proceso de manufactura de las celdas solares e identificación de insumos y desarrollo de la unidad demostrativa a escala semi-piloto con suministros comerciales	Validación de la tecnología de manufactura a escala piloto, evaluación de desempeño con las normas internacionales	Fabricación a escala industrial de paneles solares de silicio monocristalino	Comercialización de paneles solares con tecnología nacional

2025	2026	2030	2050
Desarrollo de la tecnología para obtención de sensores (dispositivos semiconductores) basados en la tecnología de silicio monocristalino (iSensMEX)	Escalamiento de la tecnología para manufactura de sensores (dispositivos semiconductores) basados en la tecnología de silicio monocristalino (iSensMEX)	Integración de la cadena de valor desde EG-Si hasta la fabricación de dispositivos semiconductores para atender problemas estratégicos nacionales	Masificación de la producción de los dispositivos semiconductores desarrollados por iSensMEX

* En México ya existen empresas que pueden comercializar el silicio grado metalúrgico.
** En caso de no encontrar sílice con las características adecuadas, definir la línea postproceso necesario para alcanzar la pureza requerida.
Fuente: elaboración propia.

CAPACIDADES EN MATERIA DE PLANEACIÓN Y CONGLOMERADOS INDUSTRIALES CON ENFOQUE SOCIAL Y AMBIENTAL

La planeación ha sido una condición necesaria en el crecimiento económico de los países desarrollados. En ella, el Estado promueve inversiones preferentemente de capital nacional y la formación de habilidades laborales para los sectores estratégicos. A diferencia del planteamiento neoliberal de ventajas comparativas y libre mercado; la política industrial aplicada al desarrollo de conglomerados regionales de producción prioriza las actividades especializadas que promueven salarios más altos y que serán nichos de innovación tecnológica. La interrupción de las cadenas de suministros, ocasionada por la crisis del covid-19, puso en duda el paradigma de producción global y obligó a plantear un esquema de proveeduría local o regional.

En esta nueva forma de producción regional, los países deben fortalecer sus capacidades tecnológicas para participar en las Cadenas Regionales de Valor (CRV) que favorezca el crecimiento de su economía y el bienestar de su población mediante producción de manufacturas con mayor contenido tecnológico nacional, que generen empleo justo y de calidad y que tengan presente el cuidado del medio ambiente.

Se requieren propuestas de política industrial que promuevan sinergias entre CP, instituciones de educación superior, iniciativa privada, banca de desarrollo y población local. Por su ubicación geográfica, México se perfila como un eslabón estratégico para generar proveedores de insumos intermedios en la CRV de América del Norte; por lo que se presenta la oportunidad de impulsar concentraciones de empresas con actividad tecnológica (*hubs*), como el planteado en el Plan Sonora, que pueden integrar una CRV en industrias como la del litio y los semiconductores.

La planeación económica ha sido condición necesaria en el crecimiento de prácticamente todas las economías desarrolladas del mundo. Países como China, los EE. UU. o Alemania se han caracterizado por promover el desarrollo de industrias estratégicas. En la actualidad, sin el apoyo del Estado sería imposible comprender las capacidades tecnológicas en materia de semiconductores de los EE. UU., China y Holanda.

La creación y desarrollo de conglomerados nacionales en cadenas regionales de valor atraviesa por tres etapas que van desde la planificación de estrategias de inversión, la puesta en marcha de un proyecto de desarrollo productivo y finalmente su integración en cadenas regionales de producción. A diferencia de la idea clásica en la que el mercado aprovechaba las ventajas comparativas de cada país, ahora, siguiendo un enfoque de planeación, los países buscan desarrollar capacidades tecnológicas y productivas para contar con ventajas competitivas. El Estado promueve inversiones de capital nacional y el desarrollo de habilidades laborales específicas para sectores estratégicos considerados detonantes del crecimiento económico de una región.

Además, bajo esta perspectiva se promueve la integración de cadenas locales de producción que permiten incrementar el valor agregado de la producción, resultando en efectos de arrastre para la economía nacional. Por último, siguiendo la idea de desarrollar ventajas competitivas se podría aprovechar de mejor manera la cercanía y relación comercial con los EE. UU., el objetivo debiera ser que México se convierta un socio

estratégico por su capacidad tecnológica y no meramente por el bajo costo de mano de obra.

Un país se inserta en las Cadenas Globales de Valor (CGV) con el objetivo de generar un escalamiento tecnológico, que consiste en ganar competitividad en productos de mayor valor agregado nacional, desarrollar capacidades tecnológicas en los procesos productivos actuales y, eventualmente, migrar hacia sectores más complejos (Taglioni y Winkler, 2016). La integración en las CGV tiene un fuerte potencial para generar ganancias en productividad mediante la innovación y el desarrollo de capacidades tecnológicas, que van de la mano de una creciente demanda de trabajo calificado causada por una mayor especialización vertical. Finalmente, el escalamiento tecnológico ocurre cuando se da un cambio en el tipo de actividad productiva que realiza un país y se caracteriza por fomentar la innovación y agregar una mayor cantidad de valor agregado nacional.

El paradigma de insertarse en las CGV hizo que los hacedores de política pública en los países periféricos orientaran sus esfuerzos en ser parte del proceso global de producción siguiendo la premisa de captar los beneficios que sus promotores han resaltado, sin una estrategia clara de creación de valor. La misma oficina de Naciones Unidas especialidad en el desarrollo de los países (UNCTAD, 2018) afirma que la simple inserción en las CGV no trae consigo beneficios en términos de mayor valor agregado en sus exportaciones, desarrollo de capacidades tecnológicas, o mayor generación de empleo, especialmente en los países en desarrollo.

La UNCTAD y Ahmad y Primi (2017) señalan que insertarse en la parte que añade menor valor agregado (procesos de maquila) de las cadenas puede ser contraproducente para los países emergentes, ya que se inhibe el desarrollo de un sector manufacturero propio o se crean incentivos fiscales para el desarrollo de industrias intensivas en mano de obra.

La interrupción de las cadenas de suministros ocasionada por la crisis del covid-19 puso en duda el paradigma de producción global y obligó a plantear un esquema de producción con proveedores locales o regionales (*nearshoring*). Al respecto, Gereffi y Fernandez-Stark (2011) sostienen que

las CGV tienden a regionalizarse en respuesta a diversos factores como el crecimiento de las economías emergentes y los acuerdos comerciales regionales. Cattaneo y colaboradores (2013) señalan que las diferentes etapas del proceso productivo se limitan a pocos países o a una región, en vez de estar dispersos globalmente. Actualmente se reconocen tres polos productivos: América del Norte, Asia y Europa, en cuyos centros se encuentran los Estados Unidos, China y Alemania, respectivamente (Baldwin y López-González, 2015); y que ahora conforman CRV.

Ante el entorno descrito, los países deben fortalecer sus capacidades tecnológicas para tener una participación dentro de las CRV que favorezca el crecimiento de su economía y el bienestar de su población a través de producción de manufacturas con mayor contenido tecnológico de origen nacional. De no contar con industrias o capacidades tecnológicas fortalecidas, la distribución del valor tiende a ser asimétrica y sesgada hacia aquellos países que dominan las actividades manufactureras con alto contenido tecnológico. Por tanto, una de las formas en que nuestro país puede avanzar en su transformación, es a través de una integración regional que dirija sus recursos y capacidades hacia una mayor competitividad.

Participar en las CRV, con mayor valor agregado de origen doméstico, implica que las propuestas de política industrial promuevan sinergias entre CP, iniciativa privada, banca de desarrollo y población local, preservando el medio ambiente y generando empleo justo y de calidad. La recomposición geográfica de la producción perfila a México como un eslabón estratégico para generar proveedores de insumos intermedios en la CRV, así como para fortalecer su mercado interno. En general, la situación actual provoca un escalamiento productivo y social, ya que el fortalecimiento de la industria se refleja en más empleos y de mejor calidad, cuidado del medio ambiente y acceso a mejores tecnologías.

A partir de lo que se presenta y considerando las oportunidades derivadas de: *1*) mayor demanda de bienes posterior a la crisis por covid-19, *2*) que las cadenas globales de suministros fueron interrumpidas, y *3*) el

repliegue de empresas norteamericanas de fábricas en Asia; se concluye que nuestro país tiene una extraordinaria oportunidad de impulsar una nueva política industrial. Se presenta la posibilidad de promover *hubs* tecnológicos, como el planteado en el Plan Sonora, que pueden integrar una CRV con los Estados Unidos y Canadá, en industrias como la del litio y los semiconductores.

Nuestro enfoque de política industrial propone fortalecer los encadenamientos regionales a partir de formar proveedores de origen mexicano con desarrollo de producción intermedia de alto contenido tecnológico. Se debe evitar caer en el error sistemático de dar facilidades a la inversión extranjera directa que sólo traslade las actividades de maquila desde China a México bajo el supuesto de aprovechar su mano de obra barata y su posición geográfica. Al respecto, se debe buscar acumular capacidades tecnológicas, mediante el fomento de una industria nacional en lugar de seguir creando parques industriales de trasnacionales orientados a la maquila. México cuenta con capacidades para insertarse activamente en etapas de alto valor.

CONSIDERACIONES FINALES

México cuenta con capacidades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación necesarias para diseñar y fabricar dispositivos y sistemas electrónicos basados en semiconductores. En particular, en sensores y actuadores para aplicaciones en salud, energía y seguridad humana y ambiental; dispositivos de conversión y almacenamiento de energía y sistemas electrónicos inteligentes. La política de Conahcyt para la articulación de capacidades científicas y tecnológicas con que cuenta el Estado mexicano, en los CP, tiene el objetivo de poner las capacidades y experiencia al servicio del país.

En el diseño de circuitos integrados, México cuenta con grupos de investigación y programas de posgrado relacionados con el diseño de estos, INAOE y Cinvestav-Guadalajara. Ambos han realizado investigación

y generado talento humano en programas de maestría y doctorado, el primero en circuitos y sistemas analógicos, y el segundo en sistemas y circuitos digitales, complementando la cadena desde la interacción analógica con sensores, la conversión digital y el procesamiento de la señal.

Por otro lado, el ensamble del circuito integrado en un encapsulamiento o paquete, tanto Cidesi como INAOE tienen experiencia, personal e infraestructura de laboratorio para realizarlo. Dicha infraestructura física y de personal tiene el conocimiento básico que puede expandirse hacia el encapsulado híbrido tridimensional, el cual es un tipo de trabajo que suele aplicarse en sistemas de sensores. Los sensores interactúan con variables físicas, químicas y biológicas en ambientes gaseosos, líquidos y sólidos en condiciones que pueden ser extremas, por lo que desarrollar este tipo de encapsulamiento híbrido tridimensional puede ubicar a México en una posición favorable en los próximos dos o tres años. Esta capacidad puede llevarse de un entorno de investigación a uno industrial, promoviendo la creación de empresas nacionales.

México tiene la oportunidad de incidir en las etapas de diseño, ensamble y pruebas del sector de semiconductores gracias a la experiencia de sus instituciones académicas y programas de posgrado. Por su parte, Conahcyt coordina con centros de investigación para desarrollar la plataforma iSensMex, que busca fabricar chips para sistemas sensoriales y promover la creación de fábricas de sensores industriales.

Finalmente, la perspectiva a futuro de integrar la industria con los CP es esencial para conocer las necesidades industriales y aplicar el conocimiento académico, fortaleciendo la cadena de valor y generando beneficios a través del uso intensivo del conocimiento tecnológico, para fortalecer los encadenamientos industriales del país.

REFERENCIAS

Ahmad, N., y Primi, A. (2017). From Domestic to Regional to Global: Factory Africa and Factory Latin America? en *Measuring and Analyzing the Impact*

of GVCs on Economic Development (pp. 69-95). World Trade Organization (WTO) (Ed.),

Alviar Morales, A. E. (2022). *Innovación tecnológica enfocada al ensamblaje o producción de semiconductores en el Ecuador.* Pontificia Universidad Católica del Ecuador. http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/19986/TESIS%20-%20ALVIAR%20MORALES%20ANDR%c3%89S%20ENRIQUE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Arjun, K. (2021). *How Asia came to dominate chipmaking and what the U.S. wants to do about it*. CNBC. https://www.cnbc.com/2021/04/12/us-semiconductor-policy-looks-to-cut-out-china-secure-supply-chain.html

Ascencio-Hurtado, C.A., Torres, A., Ambrosio, R., Moreno, M., Álvarez-Quintana, J. y Hurtado-Macías, A. (2021). N-type amorphous silicon-germanium thin films with embedded nanocrystals as a novel thermoelectric material of elevated ZT. *Journal of Alloys and Compounds*, *890*, 161843. doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161843

Baldwin, C. y López-González, J. (2015). Supply-Chain Trade: A Portrait of Global Patterns and Several Testable Hypotheses. *World Economy*, *38*(11). DOI: 10.1111/twec.12189

Burkacky, O., Dragon, J. y Lehmann, N. (2022). *La década de los semiconductores: Una industria de un billón de dólares*. McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/featured-insights/destacados/la-decada-de-los-semiconductores-una-industria-de-un-billon-de-dolares/es

Cantera, S. (14 de octubre, 2022) México tiene oportunidad de atraer inversiones para fabricar semiconductores: expertos. *El Universal*. https://www.eluniversal.com.mx/cartera/semiconductores-mexico-tiene-oportunidad-de-atraer-inversiones-para-fabricar-semiconductores-expertos

Casillas, C. (2021). Oportunidades de la escasez de semiconductores. *Inversión*, (1240), 28-31. https://www.pressreader.com/spain/inversion/20210618/281973200608309

Castillo, J., y Szirmai, A. (2016). Mexican Manufacturing and its Integration into Global Value Chains. Merit Working Papers United Nations University

- Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology (MERIT).

Cattaneo, O., Gereffi, G., Mirdout, S., y Taglioni, D. (2013). *Joining, Upgrading and Being Competitive in Global Value Chains*. World Bank Policy Research Working Paper, (6406), 52

Comisión Europea (2022). *Soberanía Digital: La Comisión propone la Ley de Chips para hacer frente a la escasez de semiconductores y reforzar el liderazgo tecnológico de Europa*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_22_729

De Luna, T. (2022). Hechos en Estados Unidos, programados en México: así serían los chips de Norteamérica. *Expansión*, 29 de septiembre, 2022. https://expansion.mx/empresas/2022/09/29/que-hara-mexico-para-la-fabricacion-de-semiconductores

Deloitte (2021). Rethinking auto semiconductor strategy in an uncertain era. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/consumer-business/deloitte-cn-cb-automotive-semiconductors-strategic-en.pdf

Dueñez Pérez, O. (2022). *La industria de semiconductores en el mundo. Mexico Industry*. https://mexicoindustry.com/invitado-editorial/la-industria-de-semiconductores-en-el-mundo#:~:text=En%202020%2C%20las%20ventas%20de,y%20TSMC%20(Taiw%C3%A1n)

Expansión (2022). Joe Biden firma ley para impulsar con 52 000 mdd la fabricación de chips en EU. *Expansión*.

Filippo, A., Guaipatín, C., Navarro, L., y Wyss, F. (2022a). *Cadena de Valor de Semiconductores: Estructura y perspectivas de cara al nuevo escenario global*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). https://publications.iadb.org/es/cadena-de-valor-de-semiconductores-estructura-y-perspectivas-de-cara-al-nuevo-escenario-global

Filippo, A., Guaipatín, C., Navarro, L. y Wyss, F. (2022b). *México y la cadena de valor de los semiconductores. oportunidades de cara al nuevo escenario global*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Mexico-y-la-cadena-de-valor-de-los-semiconductores.-oportunidades-de-cara-al-nuevo-escenario-global.pdf

Fortune Business Insights (2022). *Automotive Sensors Market Size Worth usd 15.6 Billion, Globally, by 2028 at 6.38 % CAGR*, https://www.globenewswire.com/news-release/2022/10/12/2532534/0/en/Automotive-Sensors-Market-Size-Worth-USD-15-6-Billion-Globally-by-2028-at-6-38-CAGR.html

García-Perrote Rodríguez, M. (2022). *¿Cuál es el origen de la crisis de los semiconductores que ha puesto en jaque la economía global, y qué desafíos y soluciones presenta*? https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/57047/TFG_Garcia-Perrote%20Rodriguez%2c%20Marta.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Gereffi, G., y Fernandez-Stark, K. (2016). Global Value Chain Analysis: A Primer (2a edición). Center on Globalization, Governance & Competitiveness (CGGC), Duke University.

iSensMex (2022). *Plataforma para el desarrollo y fabricación de sensores y actuadores inteligentes aplicados en energía, salud y seguridad.* Proyecto Cimav, Ciateq, INAOE, Cidesi, Comimsa.

Jones, B., Acuña, F., y Rodríguez, V. (2021). *Cadena de valor del litio: análisis de la cadena global de valor de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos.* https://hdl.handle.net/11362/47108

Markets and Markets (2021). *Biosensors Market by Type, Product (Wearable, Non-wearable), Technology, Application (POC, Home Diagnostics, Research Lab, Enviromental Monitoring, Food & Beverages, Biodefense) and Region (2021-2026).* https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biosensors-market-798.html?gclid=Cj0KCQjwkt6aBhDKARIsAAyeL-J0neSR2KvZTJ-vG9Z5cAWWwTkQ6xqxN8zqRnwmRTvD4qCNsjl-c28L8aAoh_EALw_wcB

Medina, F. A., y De La Peña, N. (2020). Las cadenas globales de valor de las manufacturas en México (2005-2015). *Apuntes del Cenes*, *39*(69), 13-38. https://doi.org/10.19053/01203053.v39.n69.2020.9998

Mena Roa, M. (2021). Intel y Samsung lideran la producción mundial de semiconductores. *Statista*. https://es.statista.com/grafico/13228/los-mayores-fabricantes-de-chips-del-mundo/

Miyashiro S., (s.f.) Global Sensores Biomédicos mercado Análisis Crecimiento por principales empresas, tendencias por tipos y análisis de previsión de aplicaciones hasta 2031. *Sticker México*. http://www.stickermexico.com/global-sensores-biomedicos-mercado-estrategias-tecnologicas-avances-comerciales-ultimas-tendencias/

Molina, J., Tiznado, H., Soto, G., Vargas, M., et al. (2018). Physical and electrical characterization of yttrium-stabilized zirconia (YSZ) thin films deposited by sputtering and atomic-layer deposition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *29*, 15349-15357. DOI: 10.1007/s10854-018-8909-3.

Mordor Intelligence. (2021) *Mercado global de semiconductores automotrices: crecimiento, tendencias, impacto de Covid-19 y pronósticos (2022-2027)*. https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/automotive-semiconductor-market

Mordor Intelligence. (2022). *Mercado de nanobiosensores: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2022-2027)*. https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-nano-biosensors-market-industry

Mordor Intelligence. (2022). *Mercado de sensores ambientales: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2022-2027)*. https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/environmental-sensors-market

Mordor Intelligence. (2022) *Mercado de sensores automotrices de México: por tipo de sensor (presión, temperatura, imagen, flujo, químico y gas, posición y proximidad), tecnología, industria, tendencias, pronóstico (2020-2025)*. https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/mexico-automotive-sensors-market-industry

Mordor Intelligence. (2022) *Mercado de sensores químicos de américa latina: por tipo (electroquímico, óptico, catalítico por carretera) aplicación (médica, automotriz, industrial, manejo ambiental) geografía, tendencias*. https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/latin-america-chemical-sensors-market-industry

Moreno, M., Martínez, J., Rosales, P., Torres, A., Murias, D., Netzahualcóyotl, C., Itzmoyotl, A., Tecuapetla, L., Hernández, A., Juárez, I. y Alarcón, P. (2016).

Development of a fabrication process of c-si solar cells towards a own technology of high effciency and large area. *XL Semana Nacional de Energía Solar*, SFV-10, 444-449.

Oliveira Andrade, R. (2017). Biosensores en medicina. *Pesquisa FAPESP*, *18*(258). https://revistapesquisa.fapesp.br/es/biosensores-en-medicina/

Ortiz-Ortega, E., Díaz-Patiño, L., Bejar, J., Trejo, G., Guerra-Balcázar, M., Espinosa-Magaña, F., Álvarez-Contreras, L., Arriaga, L.G. y Arjona, N. (2020). A Flow-Through Membraneless Microfluidic Zinc–Air Cell. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *12*(37), 41185–41199

Ugalde-Vázquez, R.M., Ambriz-Vargas, F., Morales-Morales, F., Hernández-Sebastián, N., Benítez-Lara, A., Cabrera-Sierra, R. y Gómez-Yañez, C. (2022). Effect of argon sputtering pressure on the electrochemical performance of LiFePO4 cathode. *Journal of the European Ceramic Society*, *43*(13), 407-418. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.10.030.

Taglioni, D., y Winkler, D. (2016). Making Global Value Chains Working for Development. *World Bank Group*, 1-22.

Torres Rojas, E. (2013). Los sensores revolucionarán la industria automotriz. *Forbes*. https://www.forbes.com.mx/los-sensores-revolucionaran-la-industria-automotriz/

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2018). *Identifying Regional Value Chains in Leather and Leather Products in Africa*. UNCTAD. https://unctad.org/system/files/official-document/gdsecidc2017d6_en.pdf

Verza, M. (2022). EE.UU. invita a México a plan de producción de semiconductores. *Los Ángeles Times*. https://www.latimes.com/espanol/EE.UU./articulo/2022-09-12/EE.UU.-invita-a-mexico-a-plan-de-produccion-de-semiconductores

Xiao, H., Meng, B., Ye, J., y Li, S. (2020). Are global value chains truly global? *Economic Systems Research*, *32*(1),1-25. https://doi.org/10.1080/09535314.2020.1783643

Zapata-De-Santiago, I.E. y Torres, A. (2022). a-SixGe1–x:H thermoelectric thin film Schottky diodes: characterization and applications. *American*

Journal of Engineering Research, *11*(9), 2320-0936 2320-0847, ISSN (print)

Zapata-De-Santiago, I.E. y Torres, A. (2022). *Test structures for thermoelectric thin film characterization using a green laser as heat source.* Latin American Electron Devices Conference (LAEDC 2022), Puebla, México. IEEE eCF: 590184.

7. Talento humano especializado para el Plan Sonora

INTRODUCCIÓN

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), a través de sus programas de apoyo para el fortalecimiento de la comunidad científica, aporta al Plan Sonora las capacidades de talento humano especializado que se componen de las estudiantes y los estudiantes becarios a nivel especialidad, maestría y doctorado en los diversos programas dentro del Sistema Nacional de Posgrado, Investigadores y Tecnólogos reconocidos por el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), así como personal del Conahcyt adscrito al Programa Investigadoras e Investigadores por México.

Lo que se presenta es una radiografía del universo potencial de aprovechamiento de investigadores y tecnólogos que pueden involucrarse desde su proceso formativo en las áreas estratégicas del Plan Sonora. Se presentan las capacidades de personas investigadoras y tecnólogas consolidadas y apoyadas por programas de estancias posdoctorales y del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, así como la participación de funcionarios del Consejo adscritos al Programa Investigadoras e Investigadores por México. En lo específico se hace mención de las capacidades de talento humano especializado dentro de los Centros Públicos Conahcyt y finalmente se proponen algunas estrategias de acompañamiento desde el Conahcyt para fortalecer la oferta de posgrados en la materia y de las capacidades nacionales que se requieren para el acompañamiento al Plan Sonora.

TALENTO HUMANO EN PROCESO DE FORMACIÓN

El proceso de formación de capacidades y talento humano especializado pasa por un esfuerzo articulado entre la Secretaría de Educación Pública (SEP), el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), las instituciones de educación superior (IES) y los Centros Públicos (CP). En este contexto, al Consejo le corresponde garantizar mediante el registro de los programas académicos en el Sistema Nacional de Posgrado, el acceso irrestricto a los apoyos de beca para el 100% de las estudiantes y los estudiantes inscritos en estos programas. Este esfuerzo promueve que las personas investigadoras y tecnólogas se concentren en su proceso formativo a nivel de posgrado y obtengan el título académico en los tiempos previstos, dotando al país en capacidades especializadas en diversas áreas de conocimiento.

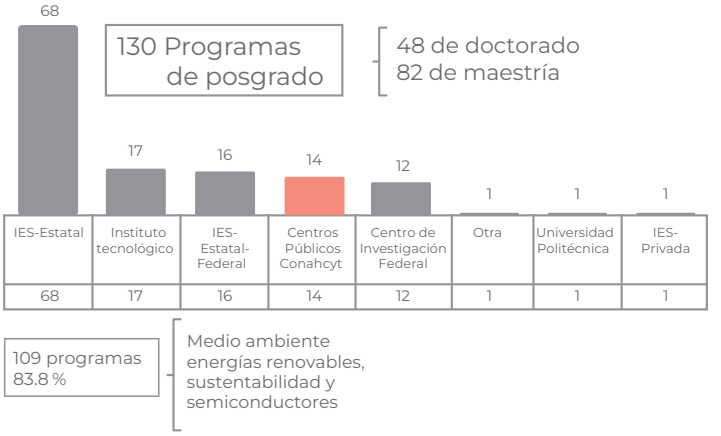
El Sistema Nacional de Posgrado se convierte también en una herramienta que permite identificar el universo de Instituciones de Educación Superior y Centros de Investigación que ofrecen, actualmente o en un futuro, programas de estudio enfocados en formar personas científicas y tecnólogas en las áreas estratégicas prioritarias para el Estado mexicano.

En complemento a lo anterior, la identificación de programas académicos afines, dentro del Sistema Nacional de Posgrado, permite plantear, según la SEP, un esquema de acompañamiento que promueva el fortalecimiento de la oferta de posgrado para lograr la titulación de personas con especialidad, maestría y doctorado en los campos de conocimiento requeridos.

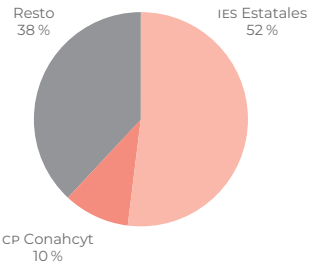
El talento humano en proceso de formación en áreas de conocimiento relativas a la agenda prioritaria del Plan Sonora, revisado desde registro del Sistema Nacional de Posgrado, hace evidente un universo de 130 programas académicos, de los cuales, el 52% se encuentra en IES estatales y el 11% en Centros Públicos Conahcyt. De los 130 programas, 48 pertenecen a nivel de doctorado y 82 a nivel maestría.

La oferta de los contenidos de los programas de posgrado en un 84% –109 programas– se enfocan en áreas de conocimiento relacionadas a los temas de medio ambiente, energías renovables, sustentabilidad y semiconductores (figura 1).

Figura 1. Número de programas por palabra clave



Programas	Número de programas
Renovable	34
Desarrollo regional	22
Automatización / control automático	12
Impactos sociales / ambientales	11
Electricidad / eléctrico(a)	8
Solar / fotovoltaico	7
Geología	7
Exploración	5
Semiconductores	5
Sensores	4
Almacenamiento de energía	3
Yacimiento	3
Automotriz	2
Explotación	2
Reciclado / reciclaje	2
Celdas	1
Minerales metálicos /materiales estratégicos /tierras raras	1
Movilidad sustentable	1
Total	**130**

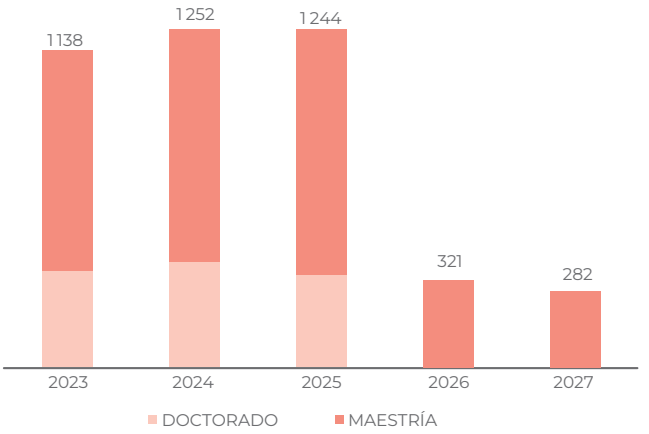


Fuente: Sistema Nacional de Posgrado.

En lo que se refiere a personas becarias, actualmente el Conahcyt apoya a 4237 estudiantes cursando posgrado en programas relacionados con los temas que inciden en la agenda estratégica del Plan Sonora; de este universo, el 59% –2535 personas– realizan estudios de maestría y el 41%, de doctorado –1702 personas–.

Dentro de este ejercicio de identificación, es posible estimar el año de egreso de las y los estudiantes, lo que permite proyectar el potencial de inserción de estas personas científicas y tecnólogas especializadas en acciones vinculantes al Plan Sonora. Esto se traduce en capacidades de talento humano potencial para los siguientes cinco años; se espera que 1252 personas que ahora estudian obtengan su título académico durante el año 2024 (figura 2).

Figura 2. Becarios vigentes de maestría y doctorado, 2023-2027



Fuente: Coordinación de Apoyos a Becarios e Investigadores.

De igual manera se identifica el número de personas becarias activas en función de los temas y áreas de conocimiento que atienden en los aspectos estratégicos del Plan, lo que, en coordinación con las instituciones de educación superior y centros de investigación, permite incidir en la formación de competencias específicas que estos temas requieran para

su adecuada implementación y desarrollo (tabla 1). Por ejemplo, las áreas de medio ambiente como energías renovables e impactos ambientales, tienen la mayor cantidad, el 43% de las personas beneficiadas con una beca inscritas a un programa de posgrado relacionado a estos temas.

Tabla 1. Personas becarias vigentes en maestría y doctorado por tema estratégico

TEMA ESTRATÉGICO	NÚMERO DE BECARIOS
Renovable	943
Impactos sociales / ambientales	897
Automatización / control automático	516
Desarrollo regional	369
Electricidad / eléctrico(a)	309
Geología	306
Semiconductores	180
Solar / fotovoltaico	144
Sensores	128
Automotriz	128
Exploración	101
Almacenamiento de energía	71
Yacimiento	54
Reciclado / reciclaje	38
Minerales metálicos / materiales estratégicos / tierras raras	32
Movilidad sustentable	14
Celdas	5
Explotación	2
Total	**4237**

Fuente: Coordinación de Apoyos a Becarios e Investigadores.

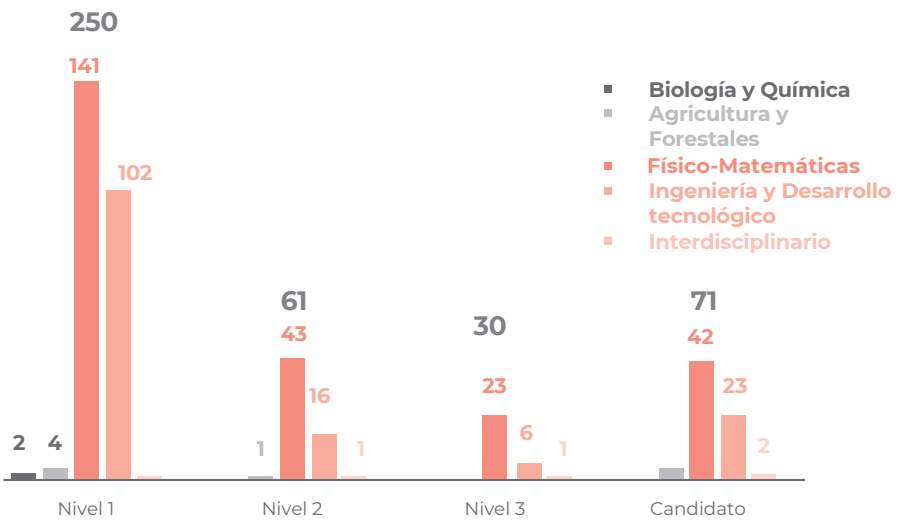
Esta radiografía del talento humano en formación permite identificar áreas de oportunidad como campos temáticos a desarrollar en posgrados

activos, o nuevos, definiendo perfiles específicos de personas científicas y tecnólogas requeridos en un tiempo determinado.

PERSONAS INVESTIGADORAS EN PROCESO DE CONSOLIDACIÓN Y CONSOLIDADOS

El universo de las y los jóvenes en proceso de formación se complementa con un número importante de personas científicas y tecnólogas ya consolidadas o en proceso de consolidación, y que reciben apoyos por parte del Conahcyt para garantizar el fortalecimiento de su desarrollo profesional. En este análisis se articulan los apoyos del programa de becas de Estancias Posdoctorales, el SNII y personal académico del Conahcyt adscrito al programa Investigadoras e Investigadores por México.

Figura 3. Personas adscritas al SNII por áreas estratégicas del Plan



Fuente: Coordinación de Apoyos a Becarios e Investigadores.

El programa de becas para estancias posdoctorales del Conahcyt registra 105 becarias y becarios vigentes trabajando en temas específicos que son de interés para el Plan: litio, baterías, almacenamiento de energía y energías renovables. Esto abre la posibilidad de fortalecer por la vía de convocatorias anuales el número de estancias que tienen una duración de dos años, prorrogables a otros dos, y que pueden enfocarse en el marco de acciones concretas de investigación y desarrollo tecnológico e innovación.

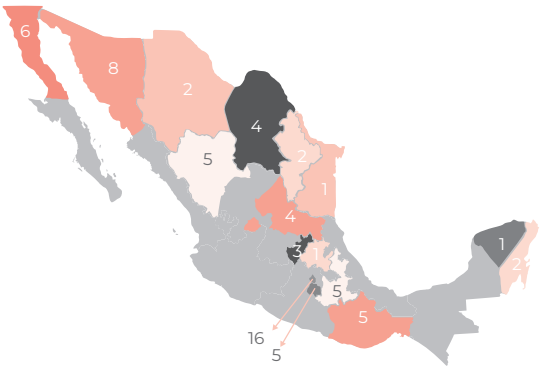
Por lo que respecta a las y los adscritos al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, se cuenta con la capacidad de 412 personas de ciencia y tecnologías de diversos niveles dentro del Sistema, lo que expresa el grado de consolidación de sus trayectorias y cuyas áreas de desarrollo están alineadas al Plan Sonora en las áreas de ingeniería y ciencias de la tierra, geología y tecnología del medio ambiente (figura 3).

En Conahcyt, actualmente se cuenta con 72 funcionarias y funcionarios del Programa de Investigadoras e Investigadores por México con perfil académico. Son personas de ciencia y tecnología comisionadas en diversas instituciones de educación superior y centros de investigación distribuidos en varios estados de la República Mexicana, realizando proyectos en líneas de investigación relacionadas con la agenda del Plan Sonora (figura 4).

Resulta importante anotar que, a nivel local, el estado de Sonora cuenta con capacidades instaladas que son útiles en el marco del Plan: ocho programas de posgrado, 20 personas adscritas al SNII y ocho personas funcionarias del Conahcyt adscritas al programa de Investigadoras e Investigadores por México.

De igual manera, es relevante mencionar que las acciones de apoyo y fortalecimiento al talento humano en las áreas relacionadas con el Plan Sonora suponen una inversión de recursos financieros por parte del Estado mexicano a través de los programas de apoyo del Conahcyt, recursos que son potencialmente aprovechables en las acciones estratégicas a desarrollar en el marco del Plan.

Figura 4. Personas investigadoras y tecnológas adscritas al Conahcyt en el Programa Investigadoras e Investigadores por México



Proyectos	Número de proyectos
Electricidad / eléctrico	1
Almacenamiento de energía	5
Celda de combustible	1
Baterías	1
Celdas	1
Desarrollo regional	3
Exploración	8
Explotación	7
Gas/Gasoducto	3
Litio	2
Minería	2
Reciclado/Reciclaje	2
Renovable	14
Sensores	2
Solar/fotovoltaico	14
Sonora	5
Yacimiento	1
Total	72

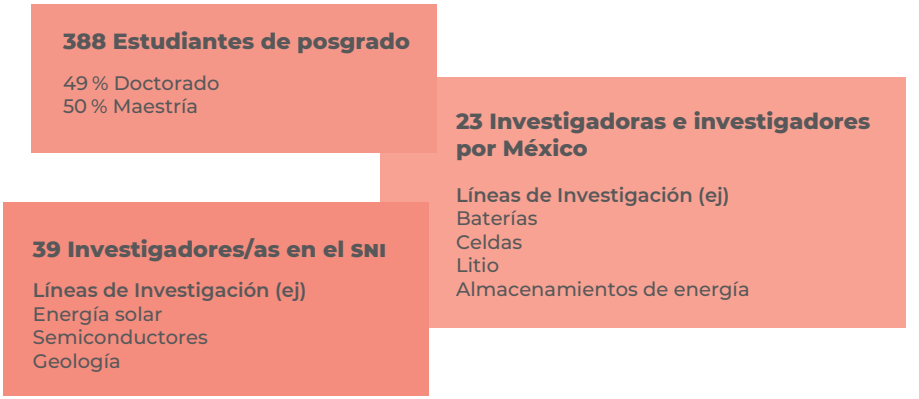
Fuente: Dirección Adjunta de Desarrollo Científico y Humanístico.

EL TALENTO HUMANO EN LOS CENTROS PÚBLICOS DEL CONAHCYT

El Conahcyt cuenta con un sistema de 26 Centros Públicos (CP) con sedes y subsedes en casi todo el territorio nacional. De este universo se identifican diez CP con capacidades instaladas tanto de infraestructura como de talento humano especializado para atender al Plan Sonora.

Existen 388 personas estudiantes de posgrado entre maestría y doctorado matriculados a algún CP, hay 39 personas del SNII y 23 funcionarias y funcionarios del Consejo adscritos al Programa de Investigadoras e Investigadores por México con distintas líneas de investigación, como se puede apreciar en el siguiente figura:

Figura 5. Talento humano



Fuente: elaboración propia.

ESTRATEGIAS PARA EL IMPULSO A LA FORMACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE TALENTO HUMANO QUE CONTRIBUYA AL PLAN SONORA

Con la radiografía presentada sobre las capacidades de talento humano especializado, instaladas y potenciales, se proponen cuatro acciones puntuales para impulsar las áreas de formación que contribuyan al Plan Sonora:

1. Desde el Sistema Nacional de Posgrado, en articulación con la SEP, las instituciones de educación superior y centros de investigación pueden ser apoyadas para que la oferta de posgrado incluya líneas de generación y aplicación de nuevo conocimiento, asignaturas optativas y seminarios de investigación con enfoque estratégico en las áreas prioritarias del Plan.
2. Verificación de la malla curricular de los programas académicos dentro del Registro del Sistema Nacional de Posgrado en áreas relacionadas con la agenda el Plan Sonora para promover la

vinculación con instancias de gobierno y del sector productivo, con empresas de base tecnológica y las agencias reguladoras.

3. Becas y apoyos en programas de posgrado estratégicos. Desde 2023 se impulsa el otorgamiento de becas y apoyos al 100% de las estudiantes y los estudiantes inscritos en programas de posgrado públicos a través de las convocatorias que se publican en el marco del programa de Becas del Conahcyt, particularmente a través de las convocatorias de posgrado y consolidación, tales como estancias posdoctorales y repatriaciones.
4. Inserción de nuevos Investigadoras e Investigadores por México durante 2024 con perfiles específicos para la atención a proyectos vinculados al Plan Sonora y que requieran ser comisionados a Instituciones de Educación Superior, Centros de Investigación e Instituciones de la Administración Pública Federal.

CONSIDERACIONES FINALES

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) impulsa el Plan Sonora mediante sus programas de fortalecimiento de la comunidad científica a través del Sistema Nacional de Posgrado. Este último tiene como objetivo formar personas científicas y tecnólogas en áreas estratégicas y prioritarias para el Estado mexicano. Una de las áreas estratégicas es la generación de energías sostenibles y, para ello, se proyecta el Plan Sonora alineado a la prospección del talento humano en formación.

Actualmente hay 130 programas académicos (48 doctorados y 82 maestrías) alineados a la estrategia del Plan Sonora. Además, se cuenta con 4237 estudiantes que cursan programas de posgrado en áreas estratégicas del Plan Sonora; hay 105 personas becadas en estancias posdoctorales y 412 adscritas y adscritos al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, enfocados también en estas áreas. Sumado a esto, los Centros Públicos (CP) están formando 388

estudiantes de posgrado, junto con 39 personas del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores y 23 funcionarias y funcionarios del programa Investigadoras e Investigadores por México, todas y todos con capacidades especializadas para el Plan Sonora.

Finalmente, como estrategia a futuro se plantea continuar con el impulso y la consolidación del talento humano bajo los siguientes lineamientos: *1*) incluir líneas de conocimiento estratégicas para el país en los programas de posgrado, *2*) verificar la malla curricular de los programas académicos para promover la vinculación con instancias gubernamentales y de sector productivo, *3*) otorgar becas y apoyos a las y los estudiantes en programas de posgrado públicos, y *4*) promover la incorporación de nuevas personas investigadoras con perfiles que contribuyan a los proyectos vinculados al Plan Sonora.

REFERENCIAS

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) (2024) – Sistema Nacional de Posgrado. https://conahcyt.mx/convocatorias/snp/

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) (s.f.) – Dirección Adjunta de Investigación Humanística y Científica https://conahcyt.mx/conahcyt/areas-del-conahcyt/desarrollo-cientifico/#:~:text=La%20Direcci%C3%B3n%20Adjunta%20de%20Investigaci%C3%B3n,grandes%20retos%20nacionales%20y%20de

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) (s.f.) – Coordinación de Apoyos a Becarios e Investigadores https://conahcyt.mx/becas_posgrados/

Sobre las autoras y autores

COORDINADORA

ALEJANDRA STRAFFON

Directora de Energías y Cambio Climático, de la Dirección Adjunta de Desarrollo Tecnológico e Innovación del Conahcyt. Es doctora en Ciencias de la Tierra por la UNAM y licenciada en Física por esta misma institución. Es miembro de la Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad y de la Asamblea Nacional de Afectados Ambientales. A su vez, participó en el Capítulo México del Tribunal Permanente de los Pueblos. Sus líneas de investigación son la variabilidad climática, la política pública ante el cambio climático y las alternativas de desarrollo social frente al deterioro ambiental. En los últimos años se ha dedicado a propiciar articulaciones y generar proyectos en temas de energía, transición energética y cambio climático.

AUTORAS Y AUTORES

DRA. MARIBEL ADRIANA CABALLERO CASTRILLO

Economista con especialidad en estadística aplicada por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), maestría en Economía y Política Pública por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y doctorado en Economía de los Recursos Naturales (UNAM). Ha sido docente en la UNAM y ayudó en la coordinación del Seminario de Investigación en Recursos Naturales 2020-2023. Actualmente labora en la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) en temas de energía, sustentabilidad y economía de los recursos naturales.

DR. JUAN CARLOS CASTILLO REYNOSO

Doctor en Ciencias de la Tierra por el Instituto de Geociencias de la UNAM, graduado con mención honorífica. Actualmente, es Investigador por México de la Secihti, donde colabora con diversas instituciones para identificar regiones con potencial para la exploración y explotación de litio en México. Sus áreas de especialización incluyen geología regional, tectónica de la Sierra Madre Occidental, geología estructural y depósitos de litio.

DR. AARÓN ALMARÁZ GÓMEZ

Ingeniero mecánico con doctorado en Tecnología Avanzada por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Sus áreas de especialización incluyen la mecánica de fluidos y la generación de modelos aplicados al procesamiento de materiales. Ha trabajado en el sector privado para la resolución de diversos problemas industriales. En 2023, se incorporó a la Secihti como Investigador por México, para colaborar en el desarrollo del proceso de extracción de litio para producir carbonato de litio de alta pureza a partir de minerales arcillosos presentes en México.

DR. RUBÉN SUÁREZ HERNÁNDEZ

Licenciado en Química Industrial y doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en Tecnología de Materiales por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM Morelos). Posee experiencia en docencia, gestión de proyectos y publicaciones científicas. Realizó una estancia en electroquímica en McGill University en Canadá y varias estancias posdoctorales en México. Se especializa en la evaluación de baterías de ion litio (BIL) comerciales y experimentales, así como en la fabricación de prototipos de BIL. Actualmente es investigador por México en la Secihti y colabora con LitioMx en proyectos para la producción de BIL en México.

DR. LEONARDO DE SILVA MUÑOZ

Ingeniero químico egresado de la Facultad de Química de la UNAM, con maestría y doctorado en Ingeniería de Procesos y del Ambiente del Instituto Politécnico Nacional de Toulouse, Francia. Cuenta con 15 años de experiencia como investigador y administrador de proyectos de innovación y desarrollo tecnológico en instituciones académicas y empresas; ha generado 13 solicitudes de patente (tres otorgadas) y 13 publicaciones científicas. Actualmente, es Investigador por México en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, y trabaja en baterías de flujo de electrodiálisis ácido-base.

DRA. LETICIA MYRIAM TORRES GUERRA

Doctora en Materiales Cerámicos Avanzados por la Universidad de Aberdeen, Escocia. Es directora general del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) desde 2019 y fue ratificada para el periodo 2024-2027. Su visión y capacidad para impulsar la ciencia la llevaron a encabezar la Dirección Adjunta de Desarrollo Científico del Conahcyt; a recibir el Premio Nacional de Ciencias en 2018, en el área de Tecnología, Innovación y Diseño, y obtener la distinción de investigadora emérita por parte del del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores en 2022. Cuenta con 256 artículos científicos, más de 5 900 citas, nueve

patentes y más de 450 conferencias científicas. Ha dirigido más de 77 tesis de posgrado. Ha liderado siete grupos de investigación y tres redes científicas nacionales, lo que demuestra su capacidad para inspirar y formar a nuevas generaciones de científicos. Además, ha desarrollado 65 proyectos de investigación y ha participado en 27 innovaciones tecnológicas, implementando un alto porcentaje de ellas en la industria.

DR. EDMUNDO ANTONIO GUTIÉRREZ DOMÍNGUEZ

Doctor en Ciencias por la Universidad Católica de Leuven en Bélgica. Es especialista en física y tecnología de dispositivos semiconductores, y ha desempeñado labores de investigación, desarrollo tecnológico, y formación académica en el sector académico público y en el sector industrial en empresas como Motorola e Intel. De 2020 a 2024 fue director general del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y actualmente es director general interino de InnovaBienestar de México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel 3, Fellow de la IEEE, y editor de revistas IEEE y *TDMR*.

DR. JOSÉ CRUZ PINEDA CASTILLO

Doctor en Ciencias (PhD) del Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG) de ENSIEG-INPG en Francia. Actualmente es investigador del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (Cidesi), centro de investigación del que fue su director general hasta enero de 2025. Tiene un consistente historial en investigación científica y desarrollo tecnológico, en la industria privada y en varios centros públicos de investigación. Es especialista en sistemas dinámicos y control, con un enfoque geométrico algebraico que conecta la teoría con el desarrollo tecnológico y la ingeniería. Ha recibido el reconocimiento IEEE R9 Eminent Engineer Award 2024, y es parte del del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel 3.

DR. JOSÉ ANTONIO ROMERO TELLAECHE

Economista por la Facultad de Economía de la UNAM, maestro por el Centro de Investigación y Docencia Económica (CIDE) y doctor en economía por la Universidad de Austin, Texas. Se ha desempeñado como profesor-investigador en el Colegio de México, donde fue director del Centro de Estudios Económicos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel 2, de múltiples comités editoriales de revistas científicas, y miembro fundador del Instituto para el Desarrollo Industrial y Crecimiento (IDIC). Ha publicado más de 100 investigaciones en revistas, libros de autoría propia y capítulos de libro, tanto a nivel nacional como internacional. Actualmente es director general del CIDE.

DR. ALFREDO AGUILAR ELGUEZABAL

Ingeniero químico industrial por el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Cuenta con una maestría en tecnología del petróleo y petroquímica y doctorado en ingeniería química por la Universidad Complutense de Madrid. Ha sido investigador en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) por 30 años, orientado al desarrollo científico de materiales nanoestructurados y sus aplicaciones tecnológicas en catálisis y materiales funcionales para diversas aplicaciones. Ha publicado más de 120 artículos científicos, con más de 3 700 citas. Cuenta con 14 patentes otorgadas o en trámite. Ha dirigido más de 30 tesis de maestría y doctorado. Ha sido presidente de la Academia de Catálisis.

COORDINACIÓN DE APOYO A BECARIOS E INVESTIGADORES

La Coordinación de Apoyos a Becarios e Investigadores (CABI) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), ahora Secihti, se encarga de gestionar los apoyos para investigadores y becarios, además de consolidar la información asociada al talento especializado de nuestro país.

Índices de figuras y tablas

FIGURAS

1. Consideraciones económicas de la cadena de valor de litio

Figura 1. Mapa de ruta 22
Figura 2. Emisiones por tipo de gases de efecto invernadero en México 25
Figura 3. Contribución por GEI a las emisiones en el ciclo de vida de vehículos de carga ligera 27
Figura 4. Evaluación de impacto del ciclo de vida de los vehículos de carga ligera en México 28
Figura 5. Emisiones de gases de efecto invernadero durante la etapa de operación de los vehículos de carga ligera o particulares 29
Figura 6. Cadena de valor de litio 32
Figura 7. Demanda anual de materiales de batería de litio, 2019-2030 38
Figura 8. Variación de precios de minerales seleccionados, 2018-2022 39
Figura 9. Demanda y oferta de litio (toneladas métricas), 2015-2040 41
Figura 10. Distribución de recursos identificados y medidos de litio en el mundo 42

Figura 11. Reestructuración geográfica de las reservas de litio, 2015-2022 44
Figura 12. Promedio anual de precio de carbonato de litio (dólares/tonelada), 2010-2024 46
Figura 13. Precios mensuales de hidróxido de litio (dólares/tonelada), 2021-2024 47
Figura 14. Aplicaciones de las baterías de ion litio en las tres áreas principales 48
Figura 15. Industria global de baterías 49
Figura 16. Proyección de crecimiento del mercado global de baterías en el periodo 2022-2030 50
Figura 17. Evolución de la división tecnológica entre vehículos 51
Figura 18. Demanda y crecimiento esperado de baterías de litio con base en la potencia eléctrica en GWh 53
Figura 19. Componentes reciclables de baterías de residuos electrónicos 56
Figura 20. Evolución del costo de las baterías de iones de litio y participación de las partes sobre el costo total, 2011-2021 (dólares /kwh y porcentajes) 59
Figura 21. Baterías de litio enviadas a reciclar (tonelada) 60
Figura 22. Capacidad de reciclaje de baterías usadas, 2018 (toneladas/métricas) 61
Figura 23. Venta de vehículos eléctricos por tipo de batería 62
Figura 24. Ventas globales de vehículos eléctricos de pasajeros por mercado, 2010-2020 63
Figura 25. Principales productores de vehículos eléctricos por región, 2020 64

Figura 26. Principales modelos de vehículos eléctricos vendidos, 2019-2020 65
Figura 27. Autos híbridos y eléctricos vendidos en México, 2022 67
Figura 28. Venta de autos de la gama eléctrico-híbridos, 2016-2022 67
Figura 29. Venta de autobuses de transporte público en México, 2018- 2022 68
Figura 30. Pasajeros y autobuses de transporte público en siete ciudades, 2022 69
Figura 31. Estados con mayores ventas de autos sustentables (%) vs. PIB (miles de pesos), 2020 70
Figura 32. Electrolineras para la recarga de baterías de autos eléctricos, 2022 71
Figura 33. Generación de RAEE en México y el mundo, 2017 74
Figura 34. Reciclaje estimado de residuos electrónicos (toneladas/año) 76

2. Prospectiva y exploración

Figura 1. Mapa de ruta de la exploración de depósitos de litio en México 90
Figura 2. Imágenes que muestran las tres principales tipologías de yacimientos de litio 94
Figura 3. Distribución de los principales depósitos de litio con recursos importantes 99
Figura 4. Distribución geográfica mundial de los principales depósitos de litio en salmueras continentales 101
Figura 5. Distribución de los principales depósitos de litio con énfasis en aquellos asociados a arcillas 110

Figura 6. Mapa geológico de México en el que se observan las principales provincias geológicas y fisiográficas del país 112
Figura 7. Equipos utilizados para la caracterización de rocas en el trabajo de exploración 115
Figura 8. Mapa geológico de México en el que se muestra la distribución de los principales tipos de roca que conforman las principales provincias geológicas 119
Figura 9. Mapa de localización de concesiones alrededor del municipio de Bacadéhuachi 123
Figura 10. Depósito de litio de La Ventana, en el municipio de Bacadéhuachi, Sonora 124
Figura 11. Polígono que delimita la zona de reserva minera de litio Li-Mx-1 125

3. Beneficio y metalurgia extractiva de productos de litio

Figura 1. Mapa de ruta del proyecto de beneficio y metalurgia extractiva de litio 142
Figura 2. Indicadores de uso y contaminación de agua para extracción de materiales 144
Figura 3. Presión parcial del litio en función de la temperatura 145
Figura 4. Contenido de litio en las principales especies minerales 147
Figura 5. Propiedades termodinámicas y solubilidades de diferentes sales 150
Figura 6. Diagrama del procesamiento de litio de recursos naturales 153
Figura 7. Proyecto Caucharí-Olaroz en Jujuy, Argentina 154

Figura 8. Diagrama del proceso de extracción de litio de salmueras de salares 155
Figura 9. Diagrama de ciclo de vida de la extracción de litio de salmueras de salares 156
Figura 10. Procesos tecnológicos que eliminan la etapa evaporativa del agua 157
Figura 11. Mina de explotación de roca dura de Greenbushes 161
Figura 12. Diagrama del proceso de extracción de litio de espodumena 162
Figura 13. Diagrama del proceso de extracción de litio de lepidolita 163
Figura 14. Diagrama del proceso de extracción de litio de espodumena mediante la ruta de ácido sulfúrico 166
Figura 15. Diagrama del ciclo de vida de la extracción de litio de espodumen 170
Figura 16. Estructura cristalina en arcillas 172
Figura 17. Estructura de la capa de lepidolita, zinnwaldita y masutomilita 173
Figura 18. Comparación de las micas que contienen litio reportadas en el diagrama ternario litio (Li) - aluminio (Al) - hierro (Fe) 174
Figura 19. Estructura de la capa de swinefordita y hectorita 175
Figura 20. Estructura de la capa de jadarita 175
Figura 21. Diagrama general de proceso de extracción de litio de arcillas 176
Figura 22. Diagrama de ciclo de vida de la extracción de litio de arcillas 178

Figura 23. Comparación de generación de GWP y consumo de agua entre operaciones extractivas de litio de espodumenas, salmueras de salares y arcillas que lo contienen 179
Figura 24. Diagrama del proceso de generación de energía eléctrica en una planta geotérmica 181
Figura 25. Diagrama del proceso de extracción directa de litio de salmueras geotérmicas 182
Figura 26. Diagrama del flujo general de la extracción de litio en arcillas 202

4. Baterías de ion litio

Figura 1. Mapa de ruta para detonar la fabricación de baterías de ion de litio en México durante el periodo 2023-2050 216
Figura 2. Esquema del arreglo y funcionamiento de una batería de iones litio 220
Figura 3. Comparación de la densidad energética de diferentes tipos de baterías 223
Figura 4. Participación en el mercado actual y futuro de los diferentes cátodos para baterías de ion de litio 224
Figura 5. Mapa de ruta creado por la Unión Europea y proyección de las características de los dispositivos de almacenamiento de energía hasta 2030 225
Figura 6. Prospectiva de la venta de vehículos eléctricos en Latinoamérica desde 2020 hasta 2026 227
Figura 7. Cadena de valor para la fabricación de baterías de fosfato de litio y hierro (LFP) 233

Figura 8. Evolución de los componentes de las baterías de ion de litio 236
Figura 9. Estructura cristalina de las principales químicas utilizadas en la fabricación de baterías de ion de litio 237
Figura 10. Principales químicas utilizadas en baterías de ion de litio y su proyección de crecimiento para 2030 238
Figura 11. Temperatura de fuga térmica y energía específica de diferentes tipos de materiales catódicos para baterías de ion de litio 241
Figura 12. Esquemas de una batería 246
Figura 13. Pasos elementales en la fabricación de una batería prismática 249
Figura 14. Sistema ciclador para procesos de la tercera etapa 250
Figura 15. Esquema de resumen del proceso de fabricación de una batería de ion de litio 251
Figura 16. Visión general de la construcción de paquetes de baterías utilizando tres tipos de geometrías 254
Figura 17. Ejemplo de un módulo de baterías prismáticas para la formación de paquetes destinados a su implementación en vehículos eléctrico 255
Figura 18. Prospectiva del suministro primario, secundario y la demanda de litio de 2020 a 2040 y contribución de material reciclado al suministro de litio a partir de 2026 260
Figura 19. Esquema general de las rutas de reciclado de cátodos de baterías de ion de litio 262
Figura 20. Respuesta electroquímica de baterías de ion de litio 264

Figura 21. Empresas de mayor impacto que se podrían articular con el Gobierno de México para el fortalecimiento de la cadena de valor de BIL 276

5. Tecnologías alternativas de almacenamiento de energía TAAE

Figura 1. Mapa de ruta para las tecnologías alternativas de almacenamiento de energía (TAAE) para el periodo 2022-2040 288
Figura 2. Tecnologías de almacenamiento de energía 292
Figura 3. Estado de algunas tecnologías de almacenamiento en función de sus requerimientos de inversión inicial y su nivel de madurez 293
Figura 4. Esquema de un sistema de almacenamiento de energía basado en hidrógeno 294
Figura 5. Ilustración de un sistema de generación, almacenamiento y transporte de hidrógeno 296
Figura 6. Diagrama básico de un electrolizador 297
Figura 7. Celdas de combustible; *a*) Partes de una celda de combustible y *b*) conjunto de celdas de combustible tipo PEM 298
Figura 8. Desarrollos de celdas de combustible (*a, b*) y electrolizadores (*c*) tipo PEM en el INEEL 301
Figura 9. Esquema de funcionamiento de una batería de flujo redox de vanadio 303
Figura 10. Esquema del funcionamiento de una batería de flujo de electrodiálisis ácido-base; *a*) modo carga, *b*) modo descarga 306
Figura 11. Esquema de una batería de flujo de electrodiálisis ácido-base 307

Figura 12. Esquema general de una batería de flujo redox 309
Figura 13. Opciones para la utilización de tecnología de almacenamiento de sales fundidas 312
Figura 14. Diagrama de una planta de generación de potencia termosolar de torre central 313
Figura 15. Planta termosolar de energía solar concentrada de Delingha 50 MW, por Supcon Solar China 314
Figura 16. Gráfico Ragone donde se pueden ubicar los dispositivos de almacenamiento de energía 316
Figura 17. Esquema de los componentes de un supercapacitor 318
Figura 18. Aplicaciones de los supercapacitores en el mercado de los Estados Unidos 319
Figura 19. Gráfica de Ragone donde se compara a las Li-S con otras tecnologías de almacenamiento de energía y dispositivos de conversión 322
Figura 20. Esquema general de una batería litio-azufre 324
Figura 21. Esquema de un perfil de descarga típico de una batería de litio-azufre con especies representativas 325
Figura 22. Esquema de los componentes y funcionamiento de una batería de litio de estado sólido 329
Figura 23. Esquema de los componentes y funcionamiento de una batería de ion de sodio 332
Figura 24. Evolución del nivel de desarrollo tecnológico de alternativas a baterías de litio como medios de almacenamiento de energía 337

6. Capacidades en materia de semiconductores de los Centros Públicos del Conahcyt

Figura 1. La cadena global de valor de los semiconductores 352
Figura 2.Distribución de la producción mundial de semiconductores por país/región (en porcentaje) 353
Figura 3. La clasificación de los diez vendedores de semiconductores líderes a nivel mundial en el primer trimestre de 2022 357
Figura 4. Tamaño del mercado de la industria global de semiconductores 358
Figura 5. Crecimiento regional del mercado en sensores ambientales (2019-2024) 362
Figura 6. Actores y su ubicación en la cadena de semiconductores en México 363
Figura 7. Circuito del proceso investigación, tecnología e innovación 366
Figura 8. Proceso de desarrollo y maduración de la fabricación de sensores en iSensMex 367

7. Talento humano especializado para el Plan Sonora

Figura 1. Número de programas por palabra clave 391
Figura 2. Becarios vigentes de maestría y doctorado, 2023-2027 392
Figura 3. Personas adscritas al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores por áreas estratégicas del Plan 394

Figura 4. Personas investigadoras y tecnológas adscritas al Conahcyt en el Programa Investigadoras e Investigadores por México 396
Figura 5. Talento humano 397

TABLAS

1. Consideraciones económicas de la cadena de valor de litio

Tabla 1. Lista de minerales críticos y estratégicos a nivel mundial 35
Tabla 2. Producción de litio 2015-2022 43
Tabla 3. Costos en la producción de baterías de Li (%) recicladas y con material virgen 58
Tabla 4. Niveles del manejo integral de residuos electrónicos 75
Tabla 5. Perfiles de talento especializado para impulsar los mercados de litio 79

2. Prospectiva y exploración

Tabla 1. Principales países con recursos identificados y medidos de litio 91
Tabla 2. Depósitos de litio de clase mundial 95
Tabla 3. Principales minerales de litio en pegmatitas 98
Tabla 4. Características de las cuencas continentales con altas concentraciones de litio a nivel global 102
Tabla 5. Principales minerales considerados del grupo de arcillas que son ricos en litio 109

Tabla 6. Perfiles de talento especializado necesarios para la exploración y prospección de depósitos de litio 129

3. Beneficio y metalurgia extractiva de productos de litio

Tabla 1. Algunas propiedades químicas del litio, sodio y potasio 145
Tabla 2. Principales especies minerales que contienen litio 148
Tabla 3. Mayores operaciones de extracción de litio en 2022 151
Tabla 4. Especies minerales de litio encontradas en arcillas 201
Tabla 5. Perfil de talento especializado para explotación minera 204
Tabla 6. Perfil de talento especializado para la planta de beneficio 204
Tabla 7. Perfil de talento especializado para el área de investigación y desarrollo 205

4. Baterías de ion litio

Tabla 1. Precursores principales utilizados para la síntesis de fosfato de litio y hierro 242
Tabla 2. Partes y componentes de una batería de ion de litio 246
Tabla 3. Proceso de fabricación de celdas de baterías de ion de litio por pasos 252
Tabla 4. Perfiles académicos para la etapa de fabricación de electrodos y celdas 277

Tabla 5. Perfiles académicos para la etapa de fabricación de módulos y paquetes 278
Tabla 6. Perfiles académicos para la etapa de aplicaciones e implementación 279
Tabla 7. Perfiles académicos para la etapa de aplicaciones de segunda vida y reciclaje 280

5. Tecnologías alternativas de almacenamiento de energía TAAE

Tabla 1. Tipos de almacenamiento de energía 290
Tabla 2. Principales tecnologías de electrólisis 297
Tabla 3. Principales tipos de celdas de combustible 299
Tabla 4. Instituciones Mexicanas con experiencia en el estudio y desarrollo de componentes de electrolizadores y celdas de combustible PEM 300
Tabla 5. Ventajas y desventajas de algunas baterías redox 304
Tabla 6. Instituciones mexicanas con experiencia en el estudio y desarrollo de baterías de flujo 310
Tabla 7. Partes y componentes de una batería de litio de estado sólido 329
Tabla 8. Ventajas de las baterías de litio de estado sólido frente a las baterías de ion de litio 331
Tabla 9. Partes y componentes de una batería de ion de sodio 334
Tabla 10. Comparativa de las ventajas y desventajas de las BIS contra las BIL 334

6. Capacidades en materia de semiconductores de los Centros Públicos del Conahcyt

Tabla 1. Infraestructura de cuartos limpios de los CP para desarrollo de nuevos materiales y semiconductores 369
Tabla 2. Trabajo futuro para el desarrollo de la producción de obleas para celdas solares y su articulación con sensores inteligentes 375

7. Talento humano especializado para el Plan Sonora

Tabla 1. Personas becarias vigentes en maestría y doctorado por tema estratégico 393

Índice general

Presentación 5
Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces

Mensaje de Litio para México 9
Pablo Daniel Taddei Arriola

Introducción 11

1. Consideraciones económicas de la cadena de valor de litio

Resumen y mapa de ruta 21
Mapa de ruta 22
Introducción 23
Aspectos económicos y ambientales 23
Movilidad y medio ambiente 24
Cadena de valor de litio 30
Caso de estudio: México 65
Mercado de electromovilidad 65
Estudio de reciclaje de baterías en méxico 72
Perfil de talento especializado para impulsar los mercados de litio 78
Consideraciones finales 80
Referencias 81

2. Prospectiva y exploración

Resumen y mapa de ruta 89
Mapa de ruta 91
Introducción 91
Estado del arte de los yacimientos de litio 93
Tipologías de yacimientos de litio 97
Contexto geológico de México y su relación con posibles depósitos anómalos de ltio 111
Metodologías de prospección y exploración de recursos minerales de litio 113
Trabajo de campo 113
Caracterización minerológica y geoquímica 114
Regiones prospectivas para ser exploradas por litio 117
Asignaciones, concesiones y proyectos mineros de litio en México 117
Servicio geológico mexicano 118
Caso de estudio “la ventana”, municipio de Bacadéhuachi, Sonora 120
Acciones del gobierno mexicano 124
Ley minera y decretos de litio 124
Proyecto de exploración Conahcyt-UNAM 126
Perfiles de talento especializado para la exploración de depósitos de litio 129
Consideraciones finales 131
Referencias 132

3. Beneficio y metalurgia extractiva de productos de litio

Resumen y mapa de ruta 141
Mapa de ruta 142

Introducción 143
Generalidades del litio 144
Estado del arte de tecnologías para la extracción de litio 151
Extracción de litio de salmueras y salares 152
Extracción de litio de rocas duras o pegmatitas 160
Extracción de litio de arcillas 171
Extracción de litio de rutas emergentes 179
Técnicas de caracterización de materiales 195
Innovación y optimización de las rutas de extracción de litio en México 199
Proyecto beneficio y metalurgia extractiva de litio Conahcyt 199
Avances en conocimiento de rutas extractivas de litio de arcillas de México 201
Perfil de talento especializado para el beneficio y metalurgia extractiva de litio 203
Consideraciones finales 206
Referencias 206

4. Baterías de ion litio

Resumen y mapa de ruta 215
Mapa de ruta 217
Introducción 217
Análisis del estado actual de las baterías de ion litio y su impacto socioeconómico 218
Fundamentos de las baterías de ion de litio y su importancia para el desarrollo sustentable 218
Prospectiva de la tecnología de baterías de ion de litio 221
Oportunidades de aplicación de la tecnología d e baterías de ion de litio 226

Cadena de valor de las baterías para el aprovechamiento del litio y minerales asociados 232
Compuestos de litio imprescindibles para detonar la fabricación de baterías de ion de litio 234
Materiales activos como componentes críticos para la fabricación de baterías de ion de litio 235
El fosfato de litio y hierro como compuesto prioritario para la soberanía tecnológica de México en materia de electromovilidad 239
Síntesis de fosfato de litio y hierro para aplicación en baterías 241
Etapas del proceso de fabricación de baterías de ion de litio 245
Escalamiento de baterías de ion de litio 253
Anteproyecto de planta piloto de fabricación de baterías de iones litio 256
Economía circular para un destino alternativo de baterías de ion de litio usadas 259
Identificación de capacidades virtuosas para detonar la fabricación de baterías de ion de litio en México 265
Estrategia de identificación, capacidades científicas y tecnológicas nacionales 265
Contribuciones específicas de instituciones nacionales para fortalecer y coadyuvar a la fabricación de baterías de ion de litio en el corto y mediano plazo 267
Consideraciones para la articulación internacional en materia de baterías de ion de litio 268
Fortalezas de méxico en investigación, desarrollo tecnológico e innovación para acelerar el conocimiento y desarrollo de baterías de ion de litio 271
Investigación 271

Desarrollo tecnológico 273
Innovación 274
Perfil de talento especializado para los eslabones de la cadena de valor de baterías de ion de litio 275
Especialidades para fortalecer los perfiles de talento especializado 281
Consideraciones finales 282
Referencia 283

5. Tecnologías alternativas de almacenamiento de energía TAAE

Resumen y mapa de ruta 287
Mapa de ruta 288
Introducción 289
Aplicaciones potenciales de las TAAE 291
Inversión inicial, riesgo tecnológico y nivel de madurez de las TAAE 292
Hidrógeno, electrolizadores y celdas de combustible 293
Sistemas de almacenamiento de energía mediante h_2 295
Electrolizadores 296
Celdas de combustible 298
Desarrollo de electrolizadores y celdas de combustible PEM en México 299
Baterías de flujo 302
Baterías de flujo Redox 303
Baterías de flujo de electrodiálisis ácido-base 305
Baterías Redox orgánicas 307
Capacidades en desarrollo de baterías de flujo en México 310
Sales fundidas 311
Descripción general de la tecnología y de su principio de funcionamiento 311

Componentes y diagrama descriptivo 312
Aplicaciones, ventajas y desventajas 314
Supercapacitores electroquímicos 315
Descripción general de la tecnología y de su principio de funcionamiento 315
Componentes principales y diagrama descriptivo 317
Aplicaciones, ventajas y desventajas 319
Baterías litio-azufre li-s 321
Descripción general de la tecnología y de su principio de funcionamiento 321
Componentes principales y diagrama descriptivo 323
Aplicaciones, ventajas y desventajas 325
Baterías litio de estado sólido 328
Descripción general de la tecnología y de su principio de funcionamiento 328
Componentes principales y diagrama descriptivo 328
Aplicaciones, ventajas y desventajas 330
Baterías de ion sodio 331
Descripción general de la tecnología y de su principio de funcionamiento 331
Componentes principales y diagrama descriptivo 332
Aplicaciones, ventajas y desventajas 333
Esquema de síntesis de tecnologías según su nivel de madurez tecnológica en el corto, mediano y largo plazo 336
Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para acelerar el conocimiento y desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento de energía en México 337
Consideraciones finales 339
Referencias 340

6. Capacidades en materia de semiconductores
de los centros públicos del Conahcyt

Introducción 349
Cadena de valor de los semiconductores 351
Potencial de mercado nacional e internacional, principales
empresas desarrolladoras y aplicaciones 356
Mercado internacional de semiconductores 356
Mercado de semiconductores en México
y América latina 361
Articulación de capacidades de los Centros
Públicos (CP): ISENSMEX 365
Proyecto ISENSMEX, construcción
de la plataforma nacional 371
Posibilidad de crear una fábrica de obleas
electrónicas en México 373
Estrategia beneficios y proyección a futuro 374
Capacidades en materia de planeación y conglomerados
industriales con el enfoque social y ambiental 376
Consideraciones finales 380
Referencias 381

7. Talento humano especializado para el Plan Sonora

Introducción 389
Talento humano en proceso de formación 390
Personas investigadoras en proceso de consolidación
y consolidados 394
El talento humano en los centros públicos
del Conahcyt 396

Estrategias para el impulso a la formación y consolidación de talento humano que contribuya al Plan Sonora 397
Consideraciones finales 398
Referencias 399

Sobre las autoras y autores 401
Índice de figuras y tablas 407

Se terminó de editar en diciembre de 2024
La edición estuvo al cuidado de la Dirección de Difusión Científica del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. Para su formación se utilizaron las familias tipográficas GMX y Montserrat.

En la última década, el litio se ha consolidado como un recurso clave en la transición energética. México busca su aprovechamiento soberano con base en el desarrollo de capacidades nacionales y altos estándares socioambientales. Gracias a las reformas a la Ley Minera (2022) y a la Constitución (2024), el litio es patrimonio nacional y su explotación está bajo la rectoría del Estado.

Este libro, coordinado por el Conahcyt, es un esfuerzo de especialistas para abordar la cadena de valor del litio: desde sus implicaciones económicas y ambientales, la exploración geológica y la metalurgia extractiva, hasta el desarrollo de baterías y semiconductores. También presenta una radiografía del talento especializado y los proyectos estratégicos que permitirán a México construir una industria nacional con un enfoque sustentable, fortaleciendo su transición energética e independencia tecnológica.

GOBIERNO DE MÉXICO
CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
Instituto Mora