

Perspectivas estratégicas del Litio en México: potencial económico y desafíos industriales



Colaboración

M.L. Quemada-Villagómez; L.I. Quemada-Villagómez; H. Jiménez-Islas; J.J. Villegas-Saucillo, Tecnológico Nacional de México en Celaya; N.L. Flores-Martínez, Universidad Politécnica de Guanajuato

Fecha de recepción: 31 de junio de 2024

Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2024

RESUMEN: El panorama del litio en México genera creciente interés científico y económico debido al descubrimiento de importantes reservas, principalmente en Sonora y Baja California. Sin embargo, el país aún no se consolida como un productor destacado a nivel mundial, encontrándose en una fase inicial de extracción. Este mineral es clave para la transición energética, al ser esencial en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos, los cuales son fundamentales en la reducción de emisiones de carbono.

México tiene el potencial de desarrollar la industria del litio mediante la producción de baterías, diversificando su economía y generando empleos. Además, incentivar la inversión y fomentar la investigación en tecnologías de extracción y procesamiento podría acelerar este desarrollo.

Gracias a sus reservas y su proximidad con Estados Unidos, un mercado estratégico para la electromovilidad, México tiene la oportunidad de convertirse en un productor global relevante. Para lograrlo, es crucial establecer un marco regulatorio robusto y políticas públicas que favorezcan la inversión, permitiendo al país posicionarse como un actor clave en el mercado internacional de baterías.

PALABRAS CLAVE: baterías, explotación, litio, vehículos eléctricos

ABSTRACT: The lithium landscape in Mexico is generating growing scientific and economic interest due to the discovery of significant reserves, mainly in Sonora and Baja California. However, the country has not yet established itself as a leading producer worldwide and is in the initial extraction phase. This mineral is key to the energy transition, as it is essential in the manufacture of batteries for electric vehicles, which are fundamental in reducing carbon emissions.

Mexico has the potential to develop the lithium industry through battery production, diversifying its economy and creating jobs. In addition, encouraging investment and promoting research in extraction and processing technologies could accelerate this development.

Thanks to its reserves and proximity to the United States, a strategic market for electromobility, Mexico has the opportunity to become a relevant global producer. To achieve this, it is crucial to establish a robust regulatory framework and public policies that favor investment, allowing the country to position itself as a key player in the international battery market.

KEYWORDS: batteries, electric vehicles, exploitation, lithium.

INTRODUCCIÓN

El litio es un elemento químico cuyo interés ha aumentado en los últimos años debido a su capacidad para almacenar energía en baterías, lo cual lo hace esencial para la tecnología moderna y la transición a fuentes de energía sostenibles. México es uno de los países más ricos en reservas de litio, con aproximadamente 3.7 millones de toneladas, por lo que su exploración y extracción pueden tener un impacto significativo en la economía, la sociedad y el medio ambiente. Sin embargo, la extracción de litio también conlleva desafíos importantes, como la degradación del suelo,

la alteración de ecosistemas naturales y la disminución de recursos hídricos. Además, este proceso puede generar costos económicos y sociales para las comunidades locales, tales como la disminución de la calidad de vida, la pérdida de tierras y recursos, así como problemas relacionados con la contaminación ambiental y la explotación laboral.

En este contexto, es fundamental considerar la sostenibilidad de la extracción de litio en México. Adicionalmente, se debe investigar el desarrollo de alternativas sostenibles al litio para su uso en baterías y promover la implementación de prácticas mineras responsables, que minimicen los impactos negativos en las comunidades y el medio ambiente. En este artículo, se analizarán en detalle los impactos económicos, ambientales y sociales de la extracción de litio en México, así como las alternativas tecnológicas sostenibles que podrían ser implementadas. También se explorarán las implicaciones y los desafíos asociados con la exploración y explotación de litio, proporcionando una visión integral de la situación actual y las oportunidades futuras.

Descripción química del litio

En su forma pura el litio es un metal blando, de color blanco plata, que se oxida rápidamente en presencia de aire o agua [1]. Es un elemento moderadamente abundante y está presente en la corteza terrestre en 65 partes por millón (ppm). El litio se encuentra presente en una amplia gama de minerales (aproximadamente 145 especies mineralógicas lo contienen), solamente algunas poseen valor económico [2]. En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas de este elemento.

También, el litio se encuentra en salmueras de diversos orígenes, como salmueras naturales, salmueras asociadas a pozos petrolíferos y a campos geotérmicos. Las salmueras con valor económico se encuentran básicamente en salares y lagos salinos. También se encuentra presente en diversas arcillas (siendo la hectorita la más importante) y en el agua de mar en concentraciones del orden de 0.17 ppm. La Tabla 2 muestra los compuestos de los que se puede extraer el litio y las concentraciones que contiene cada uno de ellos.

Tabla 1. Propiedades del Litio.

Número atómico	3	Adimensional
Peso atómico	6.941	Gramos por mol (g/mol)
Estructura	Monoclínico	Adimensional
Punto de fusión	186	Grados Celsius (°C)
Punto de ebullición	1.336	Grados Celsius (°C)
Peso específico	0.534	Gramos por centímetro cúbico (g/cm ³)
Calor específico del estado líquido (sobre 200 °C)	1.0	Calorías por gramo por grado Celsius (cal/g · °C)
Calor específico	0.784	Calorías por gramo por grado Celsius (cal/g · °C)
Resistividad	8.55	0 °C : ohm por metro (Ω/m)
Coefficiente de temperatura de la resistividad	4.5 x 10 ⁻³	Grado Celsius (°C ⁻¹)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Compuestos de los que se extrae el litio.

Nombre	Fórmula	Porcentaje de litio
Espodunema	(Si ₂ O ₆)LiAl	8%
Ambigonita	PO ₄ LiAlF	10.1%
Lepidolita	(AlSi ₃ O ₁₀)K(Li, Al)(O, OH, F)	3.3% a 7%
Petalita	LiAl(Si ₄ O ₁₀)	--

Fuente: Elaboración propia.

Usos actuales y usos potenciales previsible a futuro

El litio tiene varios usos como la elaboración de diferentes tipos de baterías, vehículos, automotores, ferrocarriles, transporte aéreo, fabricación de toda clase de artefactos y una gran variedad de máquinas industriales, teléfonos celulares, armas, generadores de electricidad, acumuladores, con gran capacidad de almacenar energía e, incluso, se utiliza en las baterías de las naves para vuelos espaciales.

Otros usos del litio radican en una rama científica completamente diferente como lo es la elaboración de diversos medicamentos; por ejemplo, el carbonato y el citrato de litio, los cuales son recursos medicinales para producir diversos fármacos usados especialmente en casos psiquiátricos, antidepresivos e incluso para el tratamiento del desorden psíquico llamado 'trastorno bipolar'[3]. Las sales de litio, sobre todo el carbonato de litio, se pueden emplear en las ciencias médico-psiquiátricas para el tratamiento del síndrome maniaco o manía, para males depresivos, para tratar trastornos de bipolaridad y otras psicopatologías más graves, aunque menos frecuentes. También es un estabilizador del estado de ánimo al trabajar de diversas formas, por ejemplo, bloqueando la liberación irregular de la dopamina, sustancia que realiza conexiones cerebrales entre neuronas[4].

Por otro lado, el litio también se utiliza para depurar el aire extrayendo el dióxido de carbono en submarinos. En las naves espaciales es requerido para el almacenamiento duradero de las baterías de naves en vuelos al espacio[5]. El cloruro y el bromuro de litio tienen elevada higroscopicidad, es decir, capacidad para absorber la humedad atmosférica, por lo cual son excelentes agentes secantes. Adicionalmente, el bromuro de litio se usa en bombas de calor de contracción, esto significa que expulsa el calor de un espacio frío, en otras palabras, hace lo mismo que una máquina frigorífica, pero con objetivo al revés: la de frigorífico absorbe calor y lo transforma en frío, la de calor toma frío y lo transforma en calor.

Otro elemento importante es el estearato de litio el cual es un lubricante usado en aplicaciones a alta temperatura. El hidróxido de litio, por su parte, se usa tanto en naves espaciales como en submarinos, en ambos casos con el mismo propósito esencial de depurar el aire y nuevamente hacerlo funcional dado que le extrae el dióxido de carbono[6].

Sin embargo, en cuanto a la revolución completa en el campo de la energía se refiere a un giro completo en fuentes de energía dado que se trata de una energía no contaminante y que, en muchos aspectos, es sumamente versátil. Las baterías de iones de litio son recargables en un inicio, lo cual es muy importante en tecnología de punta, la cual abarca la recarga de equipos de computadoras relativamente grandes o baterías de teléfonos celulares de la 5G, algunos tipos de robots o de ciertos aparatos propios de la llamada Inteligencia Artificial, etc. En cuanto a desarrollos futuros, podría utilizarse para viajes muy largos de vehículos terrestres o aéreos, sobre todo, de vuelos espaciales con pasajeros relativamente numerosos, en los que podría necesitarse de tiempos prolongados de espera antes de regresar a nuestro planeta, o bien, para instalar fuentes de recarga en las diversas estaciones espaciales.

Adicionalmente, el litio es un componente común en aleaciones de aluminio, cadmio, cobre y manganeso, éstas son empleadas en ciertas etapas de la construcción aeronáutica que implican dicha aleación. También pueden ser usadas en la creación de lentes de telescopios de gran magnitud, por ejemplo, el telescopio de Monte Palomar. Finalmente, puede tener implicaciones en el manejo de energías nucleares y atómicas [2].

Regiones productoras de litio en el mundo

Pese a que ha sido conocido desde hace 200 años y aprovechado en diferentes actividades, en años recientes su uso ha sido más valorado, sobre todo en lo que respecta a las baterías de las tecnologías de alta duración, por lo que se generó una mayor demanda en la extracción y transformación del litio. En 2019, los países con una mayor producción por toneladas de dicho mineral fueron: Australia (42 mil); Chile (18 mil); China (7 mil 500); Argentina (6 mil 400); Portugal (1,200); Namibia (500); Brasil (300); Canadá (200); Estados Unidos (s/d) y Zimbabue (s/d). En tanto, las mayores reservas están localizadas en Australia (62 millones 800 mil); Chile (8 millones 600 mil); Argentina (un millón 700 mil); China (un millón); Estados Unidos (630 mil); Canadá (370 mil); Brasil (95 mil) y Portugal (60 mil)[7].

Debido a la importancia del sector minero en la economía nacional, el marco legal del litio en México está previsto en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En su artículo 27 señala que “corresponde a la Nación el dominio directo de todos los recursos naturales de la plataforma continental y los zócalos submarinos de las islas; de todos los minerales o sustancias que se encuentran en vetas, mantos, masas o yacimientos”[8]. Asimismo, el artículo 73, fracción X de la Carta Magna faculta al Congreso Mexicano para legislar acerca de la minería. El artículo 123, fracción XII, obliga a las empresas -entre ellas las mineras- a generar condiciones de seguridad e higiene a las y los trabajadores de dichas labores.

Por su parte, la Ley Minera establece en su artículo 4 al litio como uno de los “minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos constituyen depósitos distintos de los componentes de los terrenos”[8]. La última reforma a este párrafo fue realizada a finales de abril de 2005. Además de las leyes federales existentes acerca de un elemento en particular, únicamente está vigente la Ley que Declara Reservas Mineras Nacionales a los Yacimientos de Uranio, Torio y demás Substancias de las cuales se Obtengan Isótopos Hendibles que puedan Producir Energía Nuclear; ésta data de enero de 1950.

De acuerdo con la Secretaría de Economía (SE), a finales de 2018 “El país no cuenta con ningún yacimiento de litio en explotación. Sin embargo, en los estados de Baja California, San Luis Potosí, Zacatecas y Sonora se encuentran en etapa de exploración tres yacimientos que contienen este mineral”[2]. Por lo que, ante las posibilidades de la exploración comercial de dicho mineral, los esfuerzos aún son emergentes.

La dependencia también señaló que “la balanza comercial del litio, en el periodo 2006-2016, ha mostrado un saldo deficitario, derivado de la nula producción del mineral a nivel nacional. En 2016, las exportaciones fueron de apenas \$658 dólares y las importaciones fueron de \$1.6 millones, dando como resultado un déficit de \$1,625,987 dólares”[2]. Esto, pese a diferentes señalamientos acerca de la existencia de vetas de dicho mineral en algunas regiones del norte del país. Los municipios donde se localizan los yacimientos de litio en nuestro país se muestran en la Tabla 3. [9].

Tabla 3. Municipios donde se localizan los yacimientos de litio en México.

Entidad Federativa	Característica	Municipios
Sonora	Pegmantitas	Puerto Peñasco, Pitiquito, Tubutama, El Sáric, Aconchi, Nacoziari, Huasabas, La Colorada, Suaquí Grande, Onavas, Soyopa, y Álamos
Chihuahua	Sedimentos	Nogales y Agua Prieta
	Salmueras	Ascención, Aldama, Cusihiuriachi y Jiménez
Coahuila	Salmueras	Sierra Mojada y San Pedro
Zacatecas	Salmueras	Jiménez del Teúl, Fresnillo y Villa Hidalgo
San Luis Potosí	Salmueras	Santo Domingo, Villa de Ramos, Salinas, Moctezuma y Villa de Guadalupe

Fuente: Elaboración propia.

Situación de México en el mercado internacional del litio

México tiene importantes reservas de litio y es visto como un actor emergente en el mercado del litio. Sin embargo, el país actualmente carece de una capacidad de producción significativa e infraestructura para la extracción y refinación de litio. México busca desarrollar su sector de litio mediante la inversión de empresas internacionales, a fin de competir en la creciente demanda

mundial de litio, esto para su uso en baterías para vehículos eléctricos y almacenamiento de energía.

Sin embargo, México aún tiene que desarrollar completamente su industria del litio ya que tiene una capacidad de producción limitada en comparación con los principales productores de litio como Australia, Chile y China. El gobierno mexicano ha tomado medidas para atraer inversiones y promover el desarrollo de su sector de litio, como ofrecer incentivos fiscales y agilizar el proceso de obtención de permisos para proyectos de litio [7].

México ha firmado acuerdos con varias empresas internacionales, incluida Tesla, para explorar y extraer litio en el país. Estos acuerdos tienen como objetivo aumentar la capacidad de producción y establecer instalaciones de producción de baterías de iones de litio en México, lo que aumentaría la competitividad del país en el mercado del litio. Adicionalmente, México deberá competir con los productores de litio establecidos e invertir continuamente en tecnología e infraestructura para seguir siendo competitivo en el mercado global. A pesar de estos desafíos, las importantes reservas de litio del país y el apoyo del gobierno para el desarrollo de su sector del litio lo convierten en un actor emergente en el mercado del litio con un importante potencial de crecimiento [10].

Procesos de extracción y purificación

Si bien es cierto el litio se encuentra presente tanto en pegmatitas, salmueras, pozos petrolíferos, campos geotérmicos, arcillas e incluso en los océanos, en la actualidad solamente 2 procesos de obtención han demostrado ser económicamente factibles: mediante salmueras y pegmatitas [2]. En la Figura 1 se muestra el esquema de los procesos de obtención del litio, así como los productos que se obtienen de éstos.

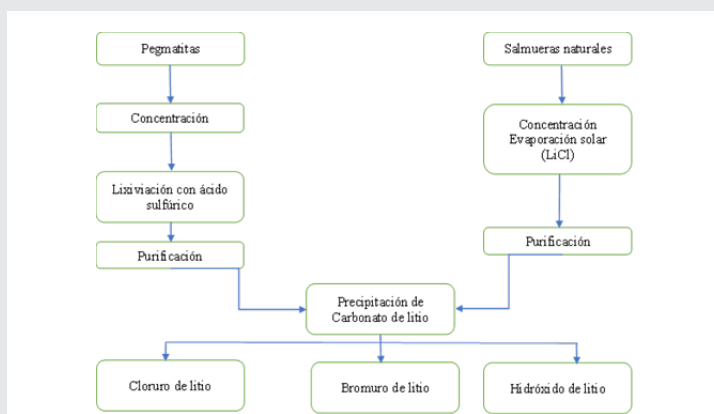


Figura 1. Procesos de extracción de litio.

Fuente: Elaboración propia.

Obtención a partir de Pegmatitas o depósitos “Roca dura”

Anteriormente la espodumena fue la principal fuente de obtención de carbonato de litio hasta que se inició

su explotación a través de su contenido en salmueras naturales. El mineral espodumena se concentra por flotación diferencial para obtener un concentrado con un contenido de 2.5 a 3.2% de litio, lo que equivale a 85 a 95% de espodumena. Para la producción de litio de la espodumena natural, el concentrado de éste debe ser calcinado previamente con caliza, posteriormente, mediante procesos de molienda, lixiviación, precipitaciones sucesivas, entre otros y dependiendo del agente tratante, se pueda extraer un alto porcentaje del litio, dando como resultado hidróxido de litio, carbonato de litio o cloruro de litio [2].

Obtención a partir de salmueras

México extrae litio principalmente a través de la extracción de salmuera, que consiste en bombear salmuera (agua salada con litio disuelto) desde los acuíferos subterráneos a la superficie y evaporar la salmuera para concentrar el litio. Una vez que la salmuera rica en litio se bombea a la superficie, se almacena en estanques de evaporación donde se deja evaporar durante varios meses, tiempo durante el cual aumenta la concentración de litio. La solución rica en litio resultante se procesa luego para extraer el litio y producir carbonato de litio, esta es la principal forma de litio utilizada en la producción de baterías de iones de litio.

El desarrollo del proceso de recuperación del litio a partir de salmueras tuvo un fuerte impacto en la industria, al constituir este proceso una fuente de litio con costos mucho más bajos en comparación a la obtención de litio a partir de los minerales pegmatíticos.

La composición de las salmueras en cuanto a los niveles de contenidos de litio varía considerablemente en la presencia de otros elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos, lo que requiere que cada salmuera sea tratada en forma particular, de acuerdo con su composición.

De manera general, la salmuera es bombeada a los estanques de baja profundidad y de dimensiones considerables donde, a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a precipitar secuencialmente un conjunto de sales. De este modo, se extraen sales tales como cloruro de potasio, cloruro de sodio, sulfato de potasio, sulfato de sodio, así como de litio, las cuales presentan impurezas de magnesio, boro y sulfato.

Posteriormente, la salmuera concentrada de litio es transportada por camiones a las plantas de procesamiento, donde es sometida a procesos de purificación y precipitación a modo de obtener carbonato de litio con una pureza cercana al 99.5%, aunque el mercado exige un mínimo de 99.1%, el cual puede comercializarse en cristales o compactarse para ser vendido en forma de gránulos. El carbonato de litio puede ser la materia prima para la producción de hidróxido de litio

o de cloruro de litio de alta pureza. Este se utiliza en la obtención de litio metálico por electrólisis de sales fundidas [11].

Problemas socioambientales derivados del uso de litio

El impacto ambiental del litio en México es un tema de preocupación creciente a medida que el país se convierte en un importante productor de esta materia prima, crítica para la producción de baterías de iones de litio, las cuales se usan principalmente en vehículos y dispositivos electrónicos. Así como el litio tiene múltiples beneficios, el procesamiento y la extracción de litio pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente. Este impacto incluye la contaminación del agua, la degradación del suelo, la emisión de gases de efecto invernadero y el uso de grandes cantidades de energía.

En el caso de México, la extracción de litio se ha concentrado en la región de Sonora [10], donde los pozos de extracción de litio pueden interferir con los recursos hídricos y la calidad del agua en la zona [12]. Además, la producción de litio puede requerir la generación de energía a partir de combustibles fósiles, lo que puede aumentar la huella de carbono del país.

Sin embargo, es posible mitigar los impactos ambientales del litio a través de la investigación e implementación de prácticas sostenibles en la producción. Por ejemplo, es posible utilizar tecnologías que reduzcan el uso de agua y energía en el procesamiento de litio, adicionalmente se puede promover la reutilización y el reciclaje de baterías de litio. Por otro lado, es importante garantizar la participación y la anuencia de las comunidades locales en la toma de decisiones relacionadas con la extracción de litio, para minimizar los impactos negativos en las personas y los medios de subsistencia [13].

Además de los impactos mencionados anteriormente, la extracción de litio puede dejar una huella significativa en la biodiversidad y los ecosistemas naturales. Por ejemplo, la construcción de infraestructuras para la extracción de litio puede interferir con las rutas migratorias de animales y afectar la calidad de vida de los ecosistemas locales. Es importante destacar que la extracción de litio a gran escala puede requerir la remoción de grandes áreas de tierra, lo cual puede resultar en la degradación del suelo y la pérdida de hábitats naturales.

En cuanto a la atmósfera, el procesamiento de litio puede generar emisiones de gases de efecto invernadero, así como otros contaminantes atmosféricos que pueden tener un impacto negativo en la calidad del aire y el clima [14].

En términos sociales, la extracción de litio puede afectar a las comunidades locales [13], promoviendo el

desalojo de personas y la pérdida de tierras y recursos naturales. Es importante garantizar que los derechos y las necesidades de las comunidades locales sean protegidos y considerados en el proceso de extracción de litio. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el impacto ambiental y social del litio en México, así como trabajar hacia una producción sostenible que mitigue estos impactos y garantice un futuro sostenible para las personas y el planeta. Lo anterior incluye la promoción de la investigación, desarrollo y la adopción de prácticas y tecnologías más sostenibles en la producción de litio.

Alternativas con potencial de sustituir a litio en su uso en baterías

La batería de iones de litio ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones electrónicas debido a su alta densidad de energía y bajo costo. Por lo tanto, la dependencia exclusiva del litio ha llevado a una búsqueda de alternativas que puedan proporcionar una solución más sostenible y diversificada. En este sentido, varios materiales se han investigado como posibles alternativas al litio en baterías, algunas de estas opciones incluyen el grafito, el litio-sulfuro, estaño, níquel-hidruro y litio-fósforo [15-17].

El grafito es un material ampliamente utilizado en baterías de iones de litio como ánodo, su reevaluación como alternativa al litio se debe a su bajo costo y mayor seguridad en comparación con el litio. Las baterías de litio-sulfuro tienen una mayor capacidad de energía que las baterías de iones de litio, lo cual las convierte en una alternativa promisoría [18]. Por otro lado, se encuentra el estaño, se trata de un metal de transición que ha demostrado ser una alternativa viable para el litio en las baterías de iones de litio. Las baterías de níquel-hidruro también tienen una mayor densidad de energía que las baterías de litio-ion [19], mientras que las baterías de litio-fósforo también han demostrado tener una alta densidad de energía, lo cual las hace viables como otra alternativa al uso del litio.

Otro tipo de baterías a considerar son las baterías de sodio [20], éstas tienen un mejor rendimiento y pueden trabajar a mayores temperaturas. Su materia prima (NaCl) es una de las más abundantes en el planeta y se obtiene por la evaporación del agua salada, lo que lo hace un material barato y sostenible, además de no necesitar otro componente para purificarse, a diferencia del litio que necesita del cobalto. Adicionalmente, son más ligeras, lo que aumentaría el rendimiento al instalarse grandes baterías en autos eléctricos, o vehículos sometidos a altas temperaturas, reduciendo también el riesgo de explosión.

Las baterías de estado sólido [19] sustituyen el electrolito líquido de las baterías de litio por uno en estado sólido, lo que reduce el peligro de ignición en los vehículos eléctricos y elimina los sistemas de seguridad

que evitan la acumulación de calor, reduciendo espacio y peso, así como costos de manufactura.

Como una solución alternativa a más largo plazo se perfila la batería de hidrógeno [21], este tipo de batería genera energía eléctrica a partir de una reacción química, por ello se considera funcional siempre y cuando se le suministre oxígeno e hidrógeno. Estas baterías no contaminan, tienen alto rendimiento en operación continua, no vibran y son silenciosas. Sin embargo, la conversión de hidrógeno en energía eléctrica resulta con una eficiencia significativamente menor a almacenar directamente la energía eléctrica en una batería de litio. Sumado a lo anterior, el suministro, transporte y producción de hidrógeno hacen que el uso de este tipo de baterías no sea rentable a la fecha.

Finalmente, el grafeno [22], como uno de los materiales más ligeros, finos y resistentes puede extender su uso hacia los supercondensadores [23]. El uso de estos materiales en los supercondensadores podría mejorar la eficiencia de energía de este material y competir directamente con las baterías de litio hasta volverse un componente esencial en los dispositivos electrónicos ya que estas baterías duran tres veces más que las baterías de iones de litio y no necesitan mantenimiento ni carga.

Propuestas estratégicas para México en la industria de litio

1. Desarrollo de un marco regulatorio sólido y transparente
 - Financiar investigaciones en métodos de extracción más sostenibles (por ejemplo, tecnologías de bajo consumo de agua o de reducción de residuos).
 - Promover la investigación en alternativas al litio para baterías, como el sodio, magnesio o tecnologías emergentes.
 - Establecer colaboraciones con universidades, centros de investigación y empresas internacionales para innovar en procesos y productos.
2. Impulso a la investigación y desarrollo (I+D) Garantizar la protección de comunidades locales y su inclusión informada en los procesos de decisión.
 - Financiar investigaciones en métodos de extracción más sostenibles (por ejemplo, tecnologías de bajo consumo de agua o de reducción de residuos).
 - Promover la investigación en alternativas al litio para baterías, como el sodio, magnesio o tecnologías emergentes.
 - Establecer colaboraciones con universidades, centros de investigación y empresas internacionales para innovar en procesos y productos.
3. Desarrollo de infraestructura industrial
 - Invertir en plantas de procesamiento de litio dentro del país, evitando que las materias primas sean exportadas sin valor agregado.
 - Invertir en plantas de procesamiento de litio dentro del país, evitando que las materias primas sean exportadas sin valor agregado.

- Establecer cadenas de suministro para la producción de baterías, enfocándose en la electromovilidad, el almacenaje de energía y otros usos estratégicos.
 - Explorar la posibilidad de asociarse con empresas tecnológicas para desarrollar una industria manufacturera avanzada en baterías.
4. Protección ambiental y desarrollo sostenible
 - Implementar políticas de restauración de áreas afectadas por la minería, como reforestación o compensación ambiental.
 - Crear un fondo de sostenibilidad financiado por las empresas mineras para invertir en proyectos de conservación ambiental y desarrollo comunitario.
 - Fomentar el uso de tecnologías de minería verde o menos invasiva.
 5. Incorporación de las comunidades locales
 - Diseñar esquemas de reparto de beneficios con comunidades afectadas por la extracción, como regalías o proyectos de desarrollo social (educación, salud e infraestructura).
 - Establecer acuerdos de consulta previa, libre e informada para garantizar que las comunidades sean partícipes del proceso de toma de decisiones.
 6. Fortalecimiento de la posición de México en el mercado internacional
 - Crear alianzas estratégicas con países líderes en la industria del litio (Chile, Australia, China) para intercambiar tecnologías y mejores prácticas.
 - Participar activamente en acuerdos y bloques regionales que impulsen el comercio de litio y productos derivados.
 - Promover a México como un actor confiable en la cadena de suministro global, destacando sostenibilidad y proximidad al mercado estadounidense.
 7. Educación y capacitación
 - Diseñar programas educativos enfocados en minería responsable, química de materiales y manufactura avanzada de baterías.
 - Formar una fuerza laboral especializada para cubrir las necesidades de la industria del litio y su cadena de valor.

RESULTADOS

Potencial económico del litio en México

México posee un potencial significativo para posicionarse como un actor relevante en la industria global del litio, sustentado principalmente en el yacimiento de litio en Sonora, considerado uno de los más grandes del mundo. Este recurso estratégico podría contribuir al crecimiento económico nacional mediante su integración en cadenas de valor vinculadas a la electromovilidad y almacenamiento de energía. Sin embargo, las proyecciones económicas revelan que el impacto en el Producto Interno Bruto (PIB) dependerá de factores clave como la viabilidad de extracción y refinamiento, así como de las políticas públicas que favorezcan la inversión y el desarrollo tecnológico.

Viabilidad industrial y tecnológica

El análisis de las capacidades industriales actuales en México exhibe una carencia de infraestructura adecuada para el refinamiento de litio y la fabricación de baterías a escala comercial. En comparación con países como Chile, China y Australia, México enfrenta desventajas significativas en términos de costos y experiencia técnica. Por otro lado, la implementación de tecnologías más sostenibles, como la extracción directa de litio (DLE, por sus siglas en inglés), podría posicionar a México como un país competitivo en la industria, siempre y cuando se superen las limitaciones actuales en investigación y desarrollo.

Impacto de las políticas públicas y desafíos legales

El establecimiento de LitoMx como empresa estatal responsable de la explotación y manejo del litio plantea un desafío considerable. Si bien esta medida busca asegurar el control soberano del recurso, la falta de un marco normativo claro y transparente ha generado incertidumbre entre inversionistas nacionales y extranjeros. Además, los conflictos sobre derechos de propiedad y uso del suelo en las áreas con potencial minero podrían retrasar proyectos estratégicos. En este contexto, la comparación con modelos de gestión en otros países indica que una colaboración público-privada podría ser más positiva para impulsar el desarrollo de la industria.

Sostenibilidad y contexto ambiental

El análisis del impacto ambiental asociado con la extracción de litio en México recalca preocupaciones sobre el consumo de agua y las afectaciones a ecosistemas locales, particularmente en regiones áridas como Sonora. Sin embargo, la adopción de tecnologías menos invasivas, junto con regulaciones ambientales estrictas, podría mitigar estos efectos. Asimismo, existe una oportunidad para desarrollar un modelo de minería responsable que posicione a México como un referente en sostenibilidad dentro del sector.

CONCLUSIONES

El litio representa una oportunidad estratégica para México, no solo por su potencial económico, sino también por su capacidad para impulsar la transición hacia un modelo energético más sustentable. Sin embargo, el aprovechamiento de este recurso enfrenta múltiples desafíos que requieren atención inmediata y coordinada. En términos económicos, la riqueza potencial del yacimiento en Sonora puede contribuir al desarrollo industrial y tecnológico, posicionando a México como un actor relevante en cadenas de valor globales vinculadas a la electromovilidad y al almacenamiento de energía. No obstante, el impacto real en la economía nacional dependerá de políticas públicas que fomenten la inversión, la innovación y la competitividad frente a otros países líderes en el mercado.

Desde una perspectiva industrial, las limitaciones actuales en infraestructura, tecnología y experiencia minera

dificultan la extracción y el refinamiento eficiente del litio. La adopción de tecnologías sostenibles y colaboraciones público-privadas podrían ofrecer soluciones viables, siempre y cuando se desarrollen bajo un marco regulatorio claro y transparente. Asimismo, los desafíos legales y sociales, como la gestión de derechos territoriales y la incertidumbre regulatoria, deben ser abordados para garantizar el desarrollo equitativo y sostenible de esta industria. La creación de LitoMx refleja un paso hacia el control soberano del recurso, pero su éxito dependerá de su capacidad para atraer inversiones y fomentar la cooperación con el sector privado.

Finalmente, el componente ambiental no puede ignorarse o menospreciarse. Las preocupaciones sobre el impacto ecológico de la extracción de litio subrayan la necesidad de adoptar prácticas responsables y sostenibles que minimicen daños a los ecosistemas locales. México tiene la oportunidad de convertirse en un referente global en minería sostenible si integra criterios ambientales en todas las etapas de la cadena productiva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Tecnológico Nacional de México (TecNM) a la investigación científica y tecnológica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] V. Bravo, *Algo Sobre El Litio Recopilado Por Víctor Bravo*, (2019).

[2] Dirección general de desarrollo minero, *Perfil de mercado del Litio*, Secr. Econ. 1 (2018) 4–10. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf.

[3] F. Mármol, *Litio: 55 años de historia en el tratamiento del trastorno bipolar*, *Med. Clin. (Barc)*. 127 (2006) 189–195. <https://doi.org/10.1157/13090712>.

[4] M. Ramírez-Santana, S. Cortés Arancibia, V.C. Bachelet, *Minería del litio: ¿Cómo enfrentar desde la ciencia un nuevo escenario de exposición en trabajadores que no ha sido antes estudiado?*, *Medwave*. 24 (2024) e3029. <https://doi.org/10.5867/medwave.2024.09.3029>.

[5] D.E. Williams, L.R. Pate, C. Hoffman, *The Lithium Hydroxide Management Plan for Removing Carbon Dioxide from the Space Shuttle while Docked to the International Space Station*, in: 2003. <https://doi.org/10.4271/2003-01-2491>.

[6] *Annual report, Naval Group*, <https://www.Naval-Group.Com/Wp-Content/Uploads/2018/04/Rapport-Financier-2017-En-1.Pdf>. (2017).

[7] J. Pablo, A. Quezada, *R egulación del litio . Propuestas*, (2021).

- [8] Diario Oficial de la federación, Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos, D. Of. La Fed. (2016) 1–194.
- [9] H.I. Flor de María, DEPÓSITOS DE LITIO EN MÉXICO, (2020).
- [10] J. Ramón, S. Moreno, México con Chihuahua y Sonora, mayor depósito mundial de litio: un recurso destinado a suplantar sociedades fincadas en petróleo, (n.d.).
- [11] M. Valdez-Rodríguez, A. Cabanillas-de-la-Cruz, X.V. Patiño-Guarneros, Perspectivas de la extracción de litio en México y sus impactos socioambientales, *Prod. Agropecu. y Desarr. Sosten.* 12 (2024) 83–98. <https://doi.org/10.5377/payds.v12i1.17418>.
- [12] H. Rubio-Arias, C.E. Quintana, K. Wood, R.A. Saucedo, R. Bautista-Margulis, Vanadium and lithium contamination in freshwaters of the Conchos River in Chihuahua, Mexico, *WIT Trans. Biomed. Heal.* 11 (2007) 171–179. <https://doi.org/10.2495/EHR070181>.
- [13] R. De Anda-márquez, M.A. García-zarate, ¿Alteraciones / cambios ? socioambientales en la Sierra Alta de Sonora a partir de la minería de litio 1, (n.d.) 1–6.
- [14] F. Malte Dorn, ¿Descarbonización o despojo? La economía política de litio e hidrógeno verde en Argentina, *Rev. Ciencias Soc.* 37 (2024). <https://doi.org/10.26489/rvs.v37i55.5>.
- [15] L. Li, Y. Lu, Q. Zhang, S. Zhao, Z. Hu, S. Chou, Recent Progress on Layered Cathode Materials for Nonaqueous Rechargeable Magnesium Batteries, *Small.* 17 (2021) 1902767. <https://doi.org/10.1002/smll.201902767>.
- [16] C. Han, W. Li, H.K. Liu, S. Dou, J. Wang, Principles and strategies for constructing a highly reversible zinc metal anode in aqueous batteries, *Nano Energy.* 74 (2020) 104880. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104880>.
- [17] T. Ohzuku, A. Ueda, Why transition metal (di) oxides are the most attractive materials for batteries, *Solid State Ionics.* 69 (1994) 201–211. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(94\)90410-3](https://doi.org/10.1016/0167-2738(94)90410-3).
- [18] K. Ozawa, Lithium-ion rechargeable batteries with LiCoO₂ and carbon electrodes: the LiCoO₂/C system, *Solid State Ionics.* 69 (1994) 212–221. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(94\)90411-1](https://doi.org/10.1016/0167-2738(94)90411-1).
- [19] M.S. Whittingham, Lithium batteries and cathode materials, *Chem. Rev.* 104 (2004) 4271–4301. <https://doi.org/10.1021/cr020731c>.
- [20] D. Geng, N. Ding, T.S.A. Hor, S.W. Chien, Z. Liu, D. Wu, X. Sun, Y. Zong, From Lithium-Oxygen to Lithium-Air Batteries: Challenges and Opportunities, *Adv. Energy Mater.* 6 (2016). <https://doi.org/10.1002/aenm.201502164>.
- [21] A. Salehabadi, E.A. Dawi, D.A. Sabur, W.K. Al-Azzawi, M. Salavati-Niasari, Progress on nano-scaled alloys and mixed metal oxides in solid-state hydrogen storage; an overview, *J. Energy Storage.* 61 (2023) 106722. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106722>.
- [22] J. Bi, Z. Du, J. Sun, Y. Liu, K. Wang, H. Du, W. Ai, W. Huang, On the Road to the Frontiers of Lithium-Ion Batteries: A Review and Outlook of Graphene Anodes, *Adv. Mater.* 35 (2023). <https://doi.org/10.1002/adma.202210734>.
- [23] A. Dutta, S. Mitra, M. Basak, T. Banerjee, A comprehensive review on batteries and supercapacitors: Development and challenges since their inception, *Energy Storage.* 5 (2023). <https://doi.org/10.1002/est2.339>.

