

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales  
Licenciatura en Ingeniería de Materiales**

**Título del trabajo:**

**Estudio de la lixiviación y precipitación de Au con  
Contenidos de  $\text{LiCO}_3$  en medio  $\text{H}_2\text{SO}_4$**

**Presenta:**

**Rodriguez Peña Renato Emilio**

**ASESORES**

**Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz  
Dr. Juan Hernández Ávila**

**Pachuca, Hgo., mayo del 2019.**



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*School of Engineering and Basic Sciences*

Mineral de la Reforma, Hgo., a 12 de diciembre de 2025

Número de control: ICBI-D/3167/2025  
Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería de Materiales **Renato Emilio Rodríguez Peña**, quien presenta el trabajo de titulación "**Estudio de la lixiviación y precipitación de Au con Contenidos de  $\text{LiCO}_3$  en medio  $\text{H}_2\text{SO}_4$** ", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente:** Dr. Juan Hernández Ávila

**Secretario:** Dr. Javier Flores Badillo

**Vocal:** Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

**Suplente:** M. en C. Monserrat Cruz Hernández

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

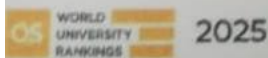
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director del ICBI



GVR/MMM

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184  
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001  
direccion\_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis doctores asesores, el doctor Juan Hernández Ávila y el doctor Eduardo Ceresedo Sáenz, por su valiosa orientación, dedicación y apoyo constante a lo largo del desarrollo de esta tesis. Sus conocimientos, consejos y exigencia académica fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

De manera especial, agradezco profundamente a mis padres, por su amor incondicional, paciencia y respaldo en cada etapa de mi formación profesional. Su ejemplo y confianza han sido mi mayor motivación para seguir adelante.

Asimismo, agradezco a mi hermana, por su apoyo constante, comprensión y palabras de aliento, que fueron de gran ayuda durante este proceso.

Finalmente, quiero agradecer a mi amigo Mauricio, por su amistad sincera, apoyo y ánimo en los momentos más exigentes, y a mi novia Leticia, por su amor, comprensión y acompañamiento incondicional, que hicieron este camino más llevadero.

A todos ellos, mi más profundo agradecimiento

## Contenido

I	Introducción .....	9
1.1	Planteamiento del problema .....	10
1.1.1	Descripción del problema .....	10
1.2	Justificación .....	11
1.3	Objetivo general.....	12
1.3.1	Objetivos específicos.....	12
1.4	Hipótesis.....	12
II	Marco Teórico .....	13
2.1	Tipos de yacimientos en México .....	13
2.2	YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS EXHALATIVOS (SEDEX) .....	15
2.3	Concentrados .....	17
2.3.1	Tipos de concentrado.....	18
2.4	MÉTODOS DE RECUPERACION DE METALES PRECIOSOS A PEQUEÑA ESCALA .....	18
2.4.1	PAN.....	18
2.4.2	Balancín .....	19
2.4.3	Esclusas.....	19
2.4.4	Mesa de agitación .....	20
2.4.5	Lavadoras en seco .....	20
2.5	Métodos de recuperación de metales preciosos por medios químicos .....	20
2.5.1	Recuperación de oro por medios no convencionales .....	21
2.5.2	Recuperación de Platino por Métodos No Tradicionales.....	22
2.6	Concepto de lixiviación .....	22
2.6.1	Teorías de lixiviación .....	22
2.6.2	Métodos Tradicionales de Lixiviación .....	23
2.7	Familia Tío .....	24
2.8	Sistemas de Lixiviación con Tiosulfatos.....	25
2.8.1	Lixiviación con Tiosulfatos.....	26
2.9	Consideraciones Cinéticas en Lixiviación .....	27
2.9.1	Efecto de la concentración.....	27
2.9.2	Efecto del Área Superficial .....	27

2.10	Tipos de Yacimientos de Litio .....	28
2.10.1	Salmueras .....	28
2.10.2	Salmueras de Campos Petrolíferos y Depósitos de Pegmatita .....	30
2.10.3	Depósitos de Pegmatita o “Roca Dura” .....	30
2.10.4	Rocas Sedimentarias que Contienen Litio .....	30
2.10.5	Depósitos de Arcilla .....	31
2.10.6	Evaporitas Lacustres .....	31
2.11	Procesos de extracción del litio .....	32
2.11.1	Obtención a partir de Pegmatitas o Depósitos de “Roca Dura” .....	32
2.11.2	Obtención a partir de Salmueras .....	33
2.11.3	Proceso de Obtención de Litio a partir de Salmueras geotérmicas .....	33
2.12	Principales Usos .....	34
2.13	EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS EXTRACTIVOS DE LITIO .....	34
III	Método experimental .....	39
3.1	Plan metodológico .....	39
3.2	Localización .....	40
3.3	Muestreo .....	40
3.4	Preparación mecánica .....	40
3.5	Difracción de Rayos X (DRX) .....	42
3.6	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) .....	43
3.7	EQUIPO Y MATERIAL PARA LIXIVIACIÓN .....	43
3.8	EQUIPO Y MATERIAL PARA LA PRECIPITACION DE Au y Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	45
IV	Resultados .....	47
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL .....	47
4.2	RESULTADOS POR LIXIVIACIÓN .....	51
V	Conclusiones .....	61
VI	REFERENCIAS .....	61

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Ubicación geográfica de los tipos de yacimientos en México .....	15
<b>Figura 2</b> Pan de metal y plástico. ....	18
<b>Figura 3</b> Máquina de balancines simples .....	19
<b>Figura 4</b> Esclusa moderna forrada en aluminio .....	19
<b>Figura 5</b> Mesa de agitación .....	20
<b>Figura 6</b> Lavadora en seco .....	20
<b>Figura 7</b> Complejantes de la Familia TIO .....	25
<b>Figura 8</b> Deposito de salmuera .....	28
<b>Figura 9</b> Deposito de salmuera continental .....	29
<b>Figura 10</b> Deposito de salmuera geotérmicas .....	29
<b>Figura 11</b> Deposito Arcilla .....	31
<b>Figura 12</b> Proceso productivo del litio .....	32
<b>Figura 13</b> Obtención de litio a partir de salmuera .....	33
<b>Figura 14</b> Obtención de litio a partir de salmuera geotérmicas .....	33
<b>Figura 15</b> Principales Usos del litio .....	34
<b>Figura 16</b> Plan metodológico .....	39
<b>Figura 17</b> Municipio de Molango, Hidalgo .....	40
<b>Figura 18</b> Deposito Red Bed .....	40
<b>Figura 19</b> Metate de Acero .....	41
<b>Figura 20</b> Tamiz No. 200 Marca W.S TYLER .....	41
<b>Figura 21</b> Ro-Tap W.S Tyler tipe HIOV-60Hz .....	41
<b>Figura 22</b> DRX Inel Modelo Equinox 2000 .....	42
<b>Figura 23</b> MEB Jeol modelo JSM-IT3000 .....	43
<b>Figura 24</b> Filtrado de la lixiviación .....	43
<b>Figura 25</b> lixiviación llevada por agitación con propela .....	43
<b>Figura 26</b> Precipitación de AU y $\text{Li}_2\text{CO}_3$ .....	45
<b>Figura 27</b> Cuarto obscuro .....	46
<b>Figura 28</b> Lampara luz UV .....	46
<b>Figura 29</b> Curva granulométrica Gaudin-schumann .....	47
<b>Figura 30</b> Imagen MEB mineral redbed .....	48
<b>Figura 31</b> EDS mineral redbed .....	49
<b>Figura 32</b> mapeo de los elementos del mineral red bed .....	50
<b>Figura 33</b> DRX del mineral red bed .....	51
<b>Figura 34</b> Espectro FTIR del depósito de lecho rojo de Molango con bandas típicas de silicatos y fases hidratadas. ....	52
<b>Figura 35</b> Espectro XPS Li 1s del depósito de lecho rojo de Molango. ....	53
<b>Figura 36</b> Morfología del mineral tipo redbed después de lixiviarlo .....	55
<b>Figura 37</b> EDS muestra lixiviada .....	56
<b>Figura 38</b> Mapeo de los elementos de la muestra lixiviada .....	57
<b>Figura 39</b> DRX de la muestra lixiviada .....	58
<b>Figura 40</b> Carbonato de litio precipitado .....	59
<b>Figura 41</b> Uranio lixiviado .....	60

## Índice de tablas

<b>Tabla 1 Material de laboratorio para lixiviación .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 2 Reactivos químicos para lixiviación .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 3 Condiciones del Experimento para lixiviación .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 4 Material de laboratorio para Precipitación de AU y Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 5 Reactivos químicos para Precipitación de AU y Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 6 Condiciones del Experimento para Precipitación de AU y Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 7 Elementos y porcentaje en peso del mineral redbed .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 8 Fases mineralógicas encontradas en la REDBED .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 9 Componentes de red bed de XRF .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 10 Elementos y porcentaje en peso de la muestra lixiviada .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 11 Fases mineralógicas del material lixiviado .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 12 Componentes del mineral lixiviado de XRF .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 13 Gramaje obtenido por incidencia de luz UV .....</b>	<b>59</b>

## Resumen

A partir de un mineral sedimentario estratiforme del subtipo RedBed. de Cu-Ag con bajos contenidos de litio, se realizó una lixiviación en medio ácido ( $H_2SO_4$ ) obteniéndose un licor de lixiviación primario para recuperar metales preciosos principalmente oro, plata, y como subproducto litio.

Así mismo, dado el alto contenido de materia orgánica inherente al tipo de yacimiento; con una matriz rica en minerales de base óxidos, se planteó el uso del tiosulfato como agente lixivante alternativo, dada su menor toxicidad, y creciente viabilidad en sistemas refractarios complejos.

Seguido, de una precipitación con ditionito de sodio para recuperar los valores metálicos y no metálicos.

El estudio combinó técnicas avanzadas de caracterización XPS obteniendo fases no metálicas como el espodumeno ( $LiAlSi_2O_6$ ), la zabuyelita ( $Li_2CO_3$ ), DRX donde se obtuvo Zabuyelita  $Li_2CO_3$  PDF 96-900-9643, SEM-EDS donde obtuvimos un porcentaje en peso de oro del 5% , FTIR obtuvimos bandas a 665 y 593  $cm^{-1}$  se atribuyen a vibraciones de Al-O y Si-O-Al así como , respectivamente, lo que indica espodumeno y posibles filosilicatos secundarios, por ejemplo, clorita , ICP en el cual se aprecia que obtuvimos 93 microgramos de oro por litro de solución FRX donde pudimos observar la presencia de aluminatos así como la matriz del mineral principalmente hematita.

A su vez se determinó que el las condiciones óptimas de reacción para llevar a cabo las lixivaciones fueron las siguientes.

Lixiviación acida a base de  $H_2SO_4$  con un pH6 de 500 ml con 20 gr de mineral de red bed a 450 rpm y a temperatura de 70° C sin calentamiento externo debido a la descomposición de carbonatos durante un periodo de 3 horas

En conjunto, la tesis aporta conocimiento original sobre la viabilidad técnica de procesos hidrometalúrgicos en minerales complejos, con aplicaciones directas en la industria extractiva mexicana y en el aprovechamiento de minerales estratégicos para la transición energética.

# I Introducción

El presente trabajo se enfoca en la Lixiviación y precipitación red bed en medio acuoso para la recuperación de materiales Au y  $Li_2CO_3$  contenida en un yacimiento sedimentario ubicado en Molango, Hidalgo. Ambos contextos presentan desafíos metalúrgicos notables. En el caso de los sulfuros, el oro suele encontrarse encapsulada en matrices que dificultan su liberación con técnicas tradicionales como la cianuración. Por su parte, los depósitos sedimentarios, en especial los de tipo red bed, contienen una mineralogía compleja en la que se combinan fases oxidadas, sulfatadas y arcillosas que afectan la eficiencia de recuperación.

Ante la creciente preocupación por el impacto ambiental del uso de cianuro, se ha intensificado la búsqueda de alternativas más sostenibles y selectivas. Una de las opciones más prometedoras es el uso de **tiosulfato de sodio** en sistemas catalizados por cobre y en presencia de oxígeno, técnica que ha demostrado ser eficaz en la disolución de oro en minerales refractarios y complejos. Este estudio se propone evaluar métodos de hidrometalurgia para obtener Oro y Carbonato de litio, analizando variables clave como la concentración de tiosulfato, la presencia de iones cúpricos y el pH del medio.

Adicionalmente, el trabajo explora la recuperación de metales preciosos en el contexto de yacimientos sedimentarios poco estudiados en México, con el fin de establecer criterios geoquímicos y metalúrgicos que permitan aprovechar estos recursos de forma más eficiente. La propuesta metodológica combina el análisis mineralógico y químico con ensayos de lixiviación controlados, buscando no solo incrementar la recuperación de oro, sino también contribuir al desarrollo de tecnologías extractivas más limpias, eficientes y adaptadas a la geología local.

## **1.1 Planteamiento del problema**

### **1.1.1 Descripción del problema**

El oro y el litio se han convertido en dos de los recursos más estratégicos del siglo XXI debido a su alta demanda en sectores tecnológicos, electrónicos y energéticos. Sin embargo, su aprovechamiento enfrenta importantes retos técnico-metalúrgicos, especialmente cuando se encuentran atrapados en matrices minerales complejas o en contextos geológicos no convencionales, como los depósitos tipo redbed o los sistemas polimetálicos con alta presencia de sulfuros.

En el caso del oro, gran parte de su contenido en minerales refractarios permanece encapsulado en fases sulfurosas o silicatadas, impidiendo su liberación mediante técnicas tradicionales como la cianuración. Este proceso, si bien eficiente en algunos contextos, genera pasivos ambientales significativos y presenta una baja eficacia cuando el metal se encuentra asociado a pirita, arsenopirita o cuarzo. Por tanto, se requiere el desarrollo de métodos alternativos de lixiviación que sean ambientalmente sostenibles y que aseguren una recuperación eficiente del oro, incluso en condiciones mineralógicas adversas.

Por otro lado, la creciente demanda de litio, en especial para la fabricación de baterías recargables y tecnologías verdes, ha despertado el interés por yacimientos sedimentarios y litios contenidos en fases no tradicionales como la espodumena, hectorita y arcillas letíferas. No obstante, la obtención de carbonato de litio a partir de estas fuentes implica procesos de calcinación, transformación estructural y lixiviación ácida que aún no están completamente optimizados. La variabilidad composicional y la baja reactividad química de algunos minerales primarios dificultan su disolución y recuperación, reduciendo la viabilidad económica y operativa de su explotación.

La presente investigación busca abordar el problema de la baja eficiencia en la recuperación de oro y carbonato de litio mediante el estudio de rutas hidrometalúrgicas alternativas, con énfasis en el uso de reactivos menos agresivos, como el tiosulfato para el oro y sistemas ácidos controlados para la extracción de litio. Se plantea como necesidad crítica comprender los factores que limitan la disolución de estos elementos en sus respectivas matrices, así como establecer condiciones operativas que favorezcan su recuperación de forma efectiva y sustentable.

## 1.2 Justificación

La recuperación eficiente de oro y carbonato de litio representa una prioridad estratégica tanto en el ámbito científico como en el industrial, dada su creciente demanda en aplicaciones tecnológicas, energías renovables y sectores de alto valor agregado. México, por su diversidad geológica, alberga tanto yacimientos auríferos de tipo epitermal como depósitos sedimentarios con potencial para la explotación de litio. No obstante, gran parte de estos recursos se encuentra en matrices complejas y poco estudiadas, lo que limita su aprovechamiento mediante tecnologías convencionales.

En el caso del oro, su presencia en minerales refractarios, comúnmente asociados a sulfuros y cuarzo, reduce drásticamente la eficiencia de la cianuración, proceso ampliamente utilizado, pero con severas implicaciones ambientales. El desarrollo de métodos alternativos, como la lixiviación con tiosulfato de sodio, ofrece una vía más segura y sustentable para recuperar oro en condiciones donde el cianuro resulta ineficaz o ambientalmente inviable. Sin embargo, su aplicación aún requiere ser optimizada en función de las características mineralógicas específicas de cada depósito.

Respecto al litio, la transformación energética global ha incrementado la presión sobre la producción de carbonato de litio, especialmente a partir de fuentes secundarias como rocas sedimentarias y arcillas. Estos materiales, aunque abundantes, presentan bajas tasas de recuperación debido a la necesidad de tratamientos térmicos y lixiviación agresiva para activar las fases portadoras de litio. En este contexto, explorar rutas más eficientes y menos contaminantes para obtener carbonato de litio como la activación térmica y lixiviación ácida controlada de minerales como la espodumena se vuelve crucial para diversificar las fuentes de este elemento crítico y reducir la dependencia de salmueras.

Desde el punto de vista académico, esta investigación aporta conocimiento original sobre la interacción entre mineralogía, geoquímica y eficiencia de los procesos hidrometalúrgicos en sistemas complejos. Desde la perspectiva tecnológica, contribuye al desarrollo de metodologías más limpias y económicamente viables para la recuperación de oro y litio. Finalmente, en términos socioambientales, se alinea con los objetivos globales de sostenibilidad, transición energética y economía circular, promoviendo una minería responsable e innovadora.

### 1.3 Objetivo general

Lixiviar y precipitar redbed en medio  $H_2SO_4$  para la recuperación de Au y  $Li_2CO_3$  así como Caracterizar y lixiviar el mineral redbed del norte del estado de hidalgo en medio  $H_2SO_4$  para la recuperación de Au y  $Li_2CO_3$  enfocándonos principalmente en la recuperación de  $Li_2CO_3$

#### I.3.1 Objetivos específicos

- Realizar Revisión bibliográfica exhaustiva de las fuentes disponibles de metalurgia
- Realizar Recolección de muestras por el método de esquirlas.
- Preparar de muestras, Conminución y análisis granulométrico.
- Caracterizar las muestras por MEB-EDS, DRX, ICP.
- Realizar la lixiviación del mineral en  $H_2SO_4$ .
- Realizar la cementación por medios no convencionales
- recuperar de Au y  $Li_2CO_3$
- Caracterizar los líquidos por ICP y los sólidos por DRX y MEB-EDS

### 1.4 Hipótesis

El empleo de reactivos complejantes durante la lixiviación de un material natural proveniente de un yacimiento tipo redbed, con contenidos de oro, carbonato de litio y tierras raras, mejorará significativamente la eficiencia de recuperación de dichos elementos. Esto se deberá a que los complejantes favorecerán la disolución selectiva de las especies metálicas presentes en matrices mineralógicas complejas, incluyendo sulfuros refractarios. Asimismo, la optimización de las composiciones de los reactivos de lixiviación permitirá obtener recuperaciones superiores con un menor impacto ambiental en comparación con los métodos tradicionales, al disminuir el uso de agentes agresivos y la generación de residuos contaminantes.

## II Marco Teórico

México se destaca a nivel mundial por su gran riqueza minera, tanto en la diversidad de especies minerales como en la cantidad y calidad de sus depósitos. La región minera de Pachuca-Real del Monte es un ejemplo importante de yacimientos de tipo hidrotermal ricos en minerales metálicos, con altas concentraciones de plata (250 g/ton), asociados con plomo, zinc, oro y cobre. Se estima que esta mineralización se formó en el período Terciario.

Esta región está subdividida en dos distritos mineros. El primero, que abarca los municipios de Pachuca, Mineral del Monte y Mineral del Chico, se caracteriza por depósitos de plata, plomo y zinc, con oro en menor proporción, distribuidos en una extensión de aproximadamente 130 km<sup>2</sup>. Este distrito ha sido históricamente explotado por sus abundantes minerales de plata, plomo y zinc. El segundo distrito, conocido como Arenal-Actopan, está asociado principalmente con la producción de oro y plata.

A lo largo de más de 350 años de explotación minera en esta región, se han utilizado diversas tecnologías de procesamiento de minerales. Inicialmente, se empleaba el método de patio, que consistía en la molienda y amalgamación de los minerales. Posteriormente, durante 47 años, se introdujo el proceso de cianuración, con los tanques Pachuca como una tecnología clave. Hoy en día, se aplican métodos como la molienda, flotación y cianuración, que fueron desarrollados en Pachuca hace más de 70 años.

No obstante, en esta región se presentan ciertos desafíos metalúrgicos. Entre ellos, destaca la presencia de minerales piríticos y cuarcíferos, que encapsulan los valores de oro y plata, reduciendo su recuperación mediante los procesos convencionales. Además, algunos minerales contienen especies que consumen cianuro, conocidas como “cianicidas”, lo que dificulta aún más la extracción efectiva de los metales preciosos.

Como resultado, gran parte de la plata y el oro quedan atrapadas en los residuos mineros (conocidos como “jales”), que contienen aún cantidades apreciables de estos metales debido a la ineficacia de los procesos convencionales para extraerlos. En particular, los metales a menudo quedan atrapados en partículas de cuarzo, o no logran cianurarse adecuadamente debido a la interferencia de especies cianicidas.

Por ello, los concentrados y los jales de esta región siguen siendo una fuente económicamente atractiva de plata, y en menor medida de oro. Para mejorar la recuperación de estos metales, se han comenzado a estudiar procesos no convencionales, como el uso de tiosulfatos, los cuales podrían incrementar significativamente la concentración y recuperación de estos valores metálicos.

### 2.1 Tipos de yacimientos en México

En México, la exploración geológica y minera se basa en diversos métodos, como encuestas de orientación, análisis geoquímicos de sedimentos de corrientes, muestreo de gases y perforaciones en áreas previamente identificadas según los resultados obtenidos en fases anteriores. Estos procesos requieren una gran inversión de tiempo y recursos.

Un yacimiento mineral se define como la concentración de una o más sustancias útiles, rodeadas de materiales no aprovechables, que se encuentran de manera dispersa en la corteza terrestre. En México, la riqueza minera es significativa debido a la gran diversidad y

abundancia de depósitos distribuidos a lo largo del territorio. Un yacimiento es una porción de la corteza terrestre en la que, debido a procesos geológicos, se acumulan minerales que, por su cantidad, calidad y contexto, pueden ser explotados de manera rentable.

En México, se pueden identificar alineaciones y concentraciones de cuerpos mineralizados que conforman cinco cinturones metalogénicos: el Cinturón Occidental, el Cinturón Central, el Cinturón Oriental, el Cinturón de Parras y el Cinturón Volcánico. Estos cinturones están asociados a estructuras tectónicas globales que ayudan a explicar la formación de los depósitos minerales, los cuales están vinculados a fenómenos geológicos como corrientes de convección, montañas oceánicas, arcos de islas y movimientos continentales.

Entre los tipos de yacimientos más comunes en México se encuentran los sulfuros masivos volcanogénicos (VMS), especialmente en depósitos del Mesozoico, como los precremanianos. Los depósitos epitermales son también muy reconocidos, entre ellos los de Pachuca, Real del Monte, Guanajuato, Fresnillo y Taxco. A nivel de diversidad, distribución y valor económico, destacan otras áreas como San Dimas-Tayoltita, Bacís y Topia (Durango), Temascaltepec y El Oro (Estado de México), Zacatecas y Sombretete (Zacatecas), Batopilas, San Francisco del Oro y Santa Bárbara (Chihuahua), entre otras.

En cuanto a los yacimientos de tipo skarn, se encuentran los distritos de Mezcala (Guerrero), San Martín y Concepción del Oro (Zacatecas), Zimapán (Hidalgo) y Naica (Chihuahua). Los depósitos de pórfidos metalíferos incluyen Cananea y La Caridad (Sonora), entre otros. También existen depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos como San Nicolás (Durango) y Francisco I Madero (Zacatecas).

México cuenta con otros tipos de depósitos relevantes, como los sedimentarios-exhalativos (Molango en Hidalgo y El Boleo en Baja California Sur), depósitos de hierro tipo IOCG (Peña Colorada, Colima), y depósitos en rocas carbonatadas tipo Mississippi Valley, con grandes concentraciones de fluorita y celestita en San Luis Potosí y Coahuila. Otros ejemplos incluyen los depósitos de cobre en capas rojas (Las Vigas, Chihuahua), pegmatitas de elementos raros (Huitzi y Telixtlahuaca, Oaxaca), y depósitos de estaño en placeres y vetas estanníferas en Durango, Zacatecas y Aguascalientes.

A pesar de que estos yacimientos son algunos de los más conocidos, México sigue teniendo un gran potencial minero, impulsado por nuevas investigaciones en depósitos minerales y el desarrollo de nuevos criterios de exploración. La rentabilidad de un yacimiento depende de factores como el tonelaje (su volumen) y la ley (el contenido del mineral en porcentaje o gramos por tonelada). La ley límite varía según el precio del material, los costos de extracción, la ubicación del yacimiento y su mineralogía. Además, la composición química, la textura y la dureza del material pueden influir en la viabilidad económica de su explotación.

La situación geográfica de los yacimientos también juega un papel crucial, pues afecta los costos de transporte. En algunos casos, puede ser rentable establecer plantas de concentración cercanas al yacimiento para reducir el volumen de material a transportar, optimizando los costos.

La vasta distribución de estos yacimientos en México resalta la importancia de su geología minera y su papel como uno de los principales países mineros del mundo como se parecía en la figura 1.

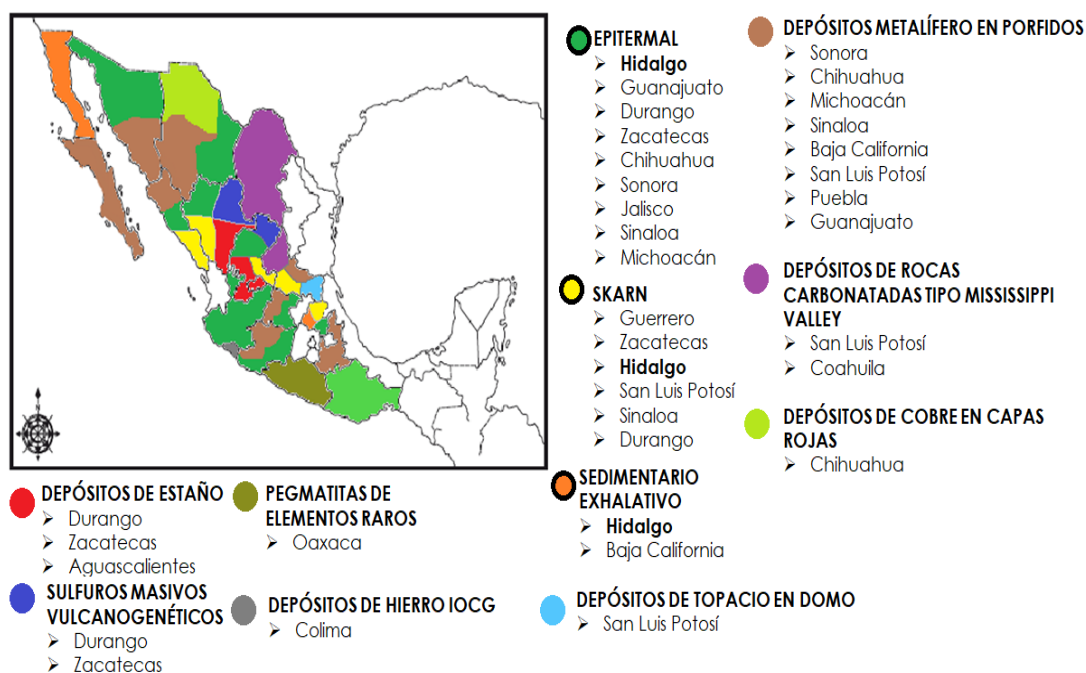


Figura 1 Ubicación geográfica de los tipos de yacimientos en México

## 2.2 YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS EXHALATIVOS (SEDEX)

Según Melgarejo (1997), los yacimientos sedimentarios exhalativos son depósitos que se forman a partir de la descarga de fluidos hidrotermales en la superficie de la corteza terrestre, ya sea en ambientes subaéreos o submarinos. Estos fluidos, que representan la manifestación externa de circuitos hidrotermales, son liberados en la superficie y forman los depósitos mencionados.

Una característica distintiva de estos yacimientos es su morfología estratiforme, aunque en algunos casos pueden estar asociados con mineralizaciones filonianas, que son interpretadas como precipitados generados en los canales de emisión de los fluidos hidrotermales. Autores como Plimer (1978) y Large (1979), citados por Melgarejo (1997), distinguen entre depósitos estratiformes proximales, donde la mineralización se presenta cerca de los canales de alimentación en fracturas, y depósitos estratiformes distales, donde la mineralización se encuentra a cierta distancia de dichos canales.

Existen diversas clasificaciones de los depósitos exhalativos, basadas en diferentes criterios como el tipo de mena dominante, el contexto geodinámico y el tipo lacolito. Una de las diferenciaciones más comunes se realiza en función del tipo de roca encajonante (Melgarejo, 1997).

En lo que respecta a los depósitos SEDEX (sedimentario-exhalativos), su subdivisión resulta más compleja que en los depósitos volcanogénicos de sulfuros masivos (VMS). Estos depósitos son estratiformes y están dispuestos en capas de pocos metros de espesor, pero con extensiones laterales que pueden alcanzar miles de metros (Large, 1983). Aunque son concordantes con los sedimentos circundantes, en algunos casos se observan mineralizaciones en stockwork en la base, que representan los canales de alimentación de los fluidos hidrotermales.

Los depósitos SEDEX contienen fluidos magmáticos del subsuelo marino, generados por el calor de cámaras magmáticas, que transportan minerales hidrotermales a través de los sedimentos. Este proceso es común en áreas geológicas como dorsales oceánicas, arcos de islas y cadenas volcánicas, donde las fumarolas negras (black smokers) descargan fluidos hidrotermales ricos en minerales.

Mineralógicamente, los depósitos SEDEX suelen dividirse en depósitos de metales base, la categoría más común, que incluye acumulaciones de metales como cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn), acompañados en menor medida por bario (Ba), plata (Ag), oro (Au), hierro (Fe) y manganeso (Mn). Estos metales se presentan mayormente en forma de sulfuros, aunque también pueden encontrarse en forma de sulfatos y óxidos, en volúmenes que varían desde varios cientos de millones de toneladas hasta cantidades subeconómicas (Jowett, 1986).

Cooke et al. (2000) proponen una clasificación adicional de los depósitos estratiformes que contienen plomo y zinc, basándose en diferencias químicas en los fluidos que los forman y en la litología de las cuencas sedimentarias. Estos investigadores sugieren la existencia de dos tipos principales de depósitos que contienen plomo y zinc: uno en ambientes oxidantes y otro en ambientes reductores. Por ejemplo, los depósitos del tipo McArthur se precipitan en ambientes oxidantes dominados por sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Una de las preguntas clave en la investigación de estos depósitos es determinar el tipo de ambiente en el que se formaron, ya sea oxidante o reductor, ya que esto es fundamental para describir la afinidad del depósito y evaluar su tonelaje estimado, así como el contenido metálico de los mismos.

### **Yacimientos tipo redbed (lecho rojo)**

Los ingredientes necesarios para formar yacimientos del subtipo cobre en lechos rojos, se dieron en el área de Molango, estos son: elemento metálico, medio de disolución de éste (solución salina), canales de conducción y topografía todos se satisfacen en esta zona.

Así, parte de la fuente de metal la proporcionó los detritos del Gneis Huiznopala, durante la etapa de extensión y en menor proporción fragmentos de rocas félsicas de la formación Tuzancoa. En tanto en el Jurásico Inferior es posible la formación de salmueras debido a ciclos de evaporación y concentración en la Formación Huayacocotla que quizá drenaron a las fosas por medio de agua meteórica en parte también por fluidos elisanos debido a esfuerzos concentrados en las fosas durante la extensión inicial, salmueras que permitieron tener el cóctel de Cu, Zn, Pb, etc. en solución.

Hacia la cima de esta formación hay evidencia de plantas de origen continental, materia orgánica que proporcionó el cambio de reductor a oxidante, Otro factor fue el canal de

conducción que fue proporcionado excelentemente por la naturaleza porosa, oxidante de los lechos rojos de la Formación Cahuwasas

La topografía preexistente del Jurásico Inferior misma que continuó en el Jurásico Medio es importante debido a la creación de nuevas fosas y pilares, topografía que contribuyó a que la corrosión cobrara tributo al Grupo Huiznopala, y cerrar el ciclo de agua meteórica, abriendo canales por las zonas de falla que encontraron alojamiento al mismo tiempo que se depositaba la Formación Cahuwasas,

Walker (1989) menciona que el primer ciclo de depósito de lechos rojos contiene detritos de minerales inestables que son susceptibles de alteración diagenética, mismos que son portadores de pequeñas cantidades de cobre y metales no ferrosos forman aproximadamente el 25 % de los sedimentos originales. Tales elementos y el cobre que contienen aproximadamente es como sigue; Plagioclasa 62 Ppm, Hornblenda 7g ppm, biotita 86 ppm, y magnetita 76 ppm.

Con base en su sensibilidad de alteración, estos minerales proporcionan los mejores recursos de los yacimientos de este subtipo, En Molango, los metales fueron liberados por alteración diagenética posterior que se sabe acompaña a este tipo de yacimientos en lechos rojos (Walker, 1989).

Las evidencias de estas alteraciones son las siguientes; conversión de hierro amorfo a hematita, continuando posiblemente con esmectita a lilita, después el reemplazamiento de feldespato y minerales arcillosos por carbonato, finalizando con albanización de la matriz de los minerales arcillosos.

En el caso del cobre se asume migración, principalmente como complejos de cloruro cuproso, esta migración es favorable cuando alguna de las alteraciones coincide con la expulsión de cloruro rico en valores metálicos, la formación de aguas asociadas con sedimentos de afinidad marina como el caso de la Formación Huayacocotla o evaporitas.

Con base en la evidencia de la naturaleza oxidante de los lechos rojos y debido a la baja solubilidad del cobre a un pH neutro bajo condiciones oxidantes, esta área favoreció las condiciones para el transporte de cobre, (Rose, 1989) al incremento de pH, permitiendo una hidrólisis de los minerales silicatados que originó un ambiente oxido-reductor. Se puede agregar que la temperatura en que se llevó a cabo la diagénesis no excedió los 100 grados, (Rose, 1989) debido que en la fase de oxido reducción de relativamente oxidación de los fluidos ricos en cobre es cercana a esta temperatura, dentro de las rocas con materia orgánica y pirita.

## **2.3 Concentrados**

Un concentrado es el producto obtenido del mineral de cobre extraído de la mina, tras pasar por un proceso de trituración, molienda y flotación. Durante la flotación, se emplea una gran cantidad de agua, y el mineral, que se encuentra en forma de pulpa, se mezcla con reactivos conocidos como colectores, espumantes y depresores, entre otros. Estos reactivos generan una espuma que recoge el metal deseado, junto con otros elementos presentes que han sido finalmente molidos. En este proceso, se recupera principalmente cobre combinado con azufre, además de otros metales como oro, plata, selenio, molibdeno, renio, hierro, entre

otros. El concentrado resultante es una mezcla de agua y diversos metales, algunos deseables y otros no tanto.

### II.3.1 Tipos de concentrado

Los concentrados se clasifican según el tipo de mineral que se procesa, de la siguiente manera:

- **Concentrados de hierro** (excluyendo las pirritas de hierro tostadas).
- **Concentrados a granel o minerales industriales:** Estos concentrados contienen más de un metal con valor comercial, como plata y plomo, y pueden incluir también zinc o cobre. Este tipo de concentrados también se clasifica como concentrados de minerales preciosos, ya que pueden contener metales como oro y plata.
- **Concentrados de minerales no metálicos no ferrosos:** Incluyen minerales no metálicos que han pasado por un proceso de lixiviación para mejorar su calidad y adecuarlos al mercado según su composición química y propiedades físicas. Dentro de esta categoría se incluyen minerales como los calcáreos, arcillas, fosfatos y silicatos, que cumplen con las especificaciones requeridas para su comercialización.

## 2.4 METODOS DE RECUPERACION DE METALES PRECIOSOS A PEQUEÑA ESCALA

### II.4.1 PAN

En una bandeja se concentran los minerales y se separan por densidad, donde los materiales más ligeros se concentran en la parte superior, mientras los pesados se concentran en la parte inferior del pan, el funcionamiento es simple, pero requiere de experiencia y habilidad para obtener grandes cantidades de material y lograr la máxima recuperación la cual la podemos apreciar en la figura 2.



Figura 2 Pan de metal y plástico.

## II.4.2 Balancín

Los balancines se construyen en tres partes distintas que consisten en, un cuerpo o caja de compuerta, una pantalla y un delantal como en la figura 3. El piso del cuerpo contiene los rifles en los que se captura el oro. La pantalla retiene los materiales más gruesos y es un lugar donde la arcilla puede disminuir su tamaño para eliminar todas las pequeñas partículas de oro. Las pantallas suelen ser de 16 a 20 pulgadas en cada lado con aberturas de media pulgada. El material fino se lava a través de las aberturas con agua en un delantal inclinado. El delantal se utiliza para llevar todo el material a la cabeza del balancín, este está hecho de lienzo estirado libremente sobre un marco. Tiene un bolsillo, en el que se pueden recoger arenas gruesas de oro y negras. El delantal puede estar hecho de una variedad de materiales: manta, alfombra, lona, etc. Los rifles debajo del delantal ayudan a recolectar oro antes de la descarga [46].

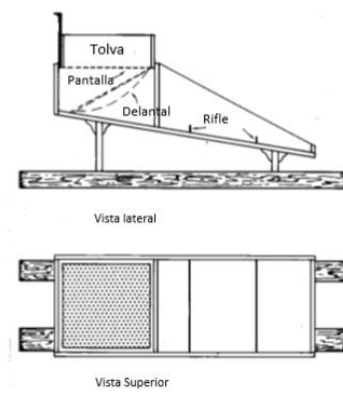


Figura 3 Máquina de balancines simples

## II.4.3 Esclusas

Una esclusa se define generalmente como un canal artificial por el cual fluyen cantidades controladas de agua. La caja de esclusas y los canales son una de las formas más antiguas de dispositivos de separación por gravedad que se usan aún en la actualidad mostrado en la figura 4. Las cajas de esclusa se pueden hacer de madera, aluminio, plástico o acero.

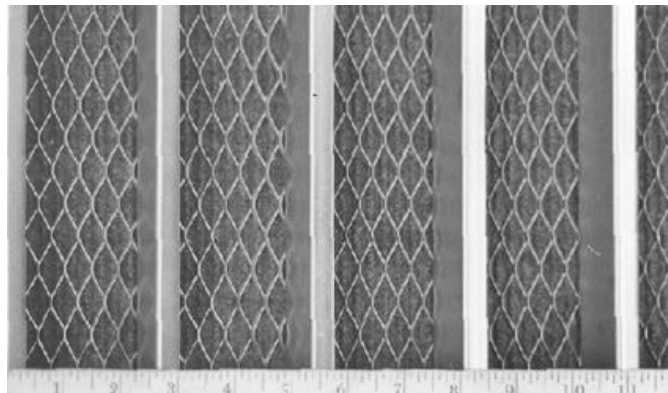


Figura 4 Esclusa moderna forrada en aluminio

#### II.4.4 Mesa de agitación

Las mesas de agitación, consisten en una plataforma con canales en un soporte, la mesa obtiene su agitación a través de un motor, generalmente montado en un lado, el cual impulsa un pequeño brazo que sacude la mesa a lo largo de su longitud [46]. Una imagen de esta la podemos observar en la figura 5.

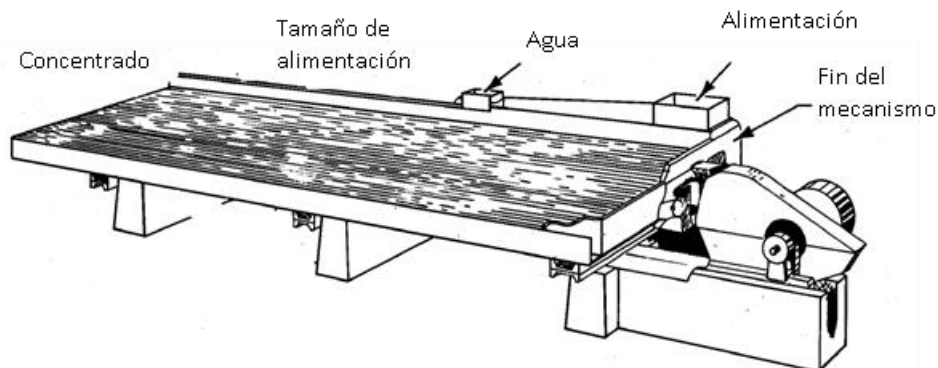


Figura 5 Mesa de agitación

#### II.4.5 Lavadoras en seco

La técnica de lavado en seco consiste en una exclusiva corta y como lo indica su nombre, seca, como se observa en la figura 6. separa el oro de la arena por pulsaciones de aire a través de poros

### 2.5 Métodos de recuperación de metales preciosos por medios químicos

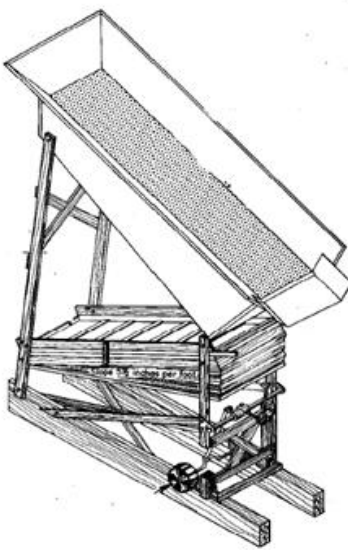


Figura 6 Lavadora en seco

La recuperación de metales preciosos como oro, platino, etc. es interesante debido a sus altos precios de mercado junto con diversas aplicaciones industriales. El intercambio iónico, la unión química, la precipitación superficial, etc., que se han desarrollado para la recuperación de dichos metales no son económicamente atractivos. Los metales preciosos son ampliamente utilizados como catalizadores en diversas industrias, agricultura y medicina. Debido a sus propiedades físicas y químicas. Económicamente, los metales preciosos son históricamente importantes como moneda y siguen siendo importantes como productos de inversión. El oro (Au) y el platino (Pt) se reconocen internacionalmente como formas de moneda según la norma ISO 4217. Debido a la limitada disponibilidad de los metales preciosos, la recuperación de estos metales a partir de soluciones acuosas y de residuos es económicamente atractiva [34].

### **II.5.1 Recuperación de oro por medios no convencionales**

La demanda de oro (Au) ha ido en aumento ya que se utiliza como un estándar momentáneo y su amplia utilización en diferentes aplicaciones. El oro se usa comúnmente en medicamentos electrónicos, de joyería y contra la artritis. El aumento de la demanda de oro ha aumentado el interés en la recuperación de oro de soluciones de desechos, como las de refinaciones o extracción de efluentes con altas concentraciones de oro [34]. La amalgamación con mercurio es el método predominante para la extracción de oro utilizado por 10 millones de mineros de oro a pequeña escala (SSGM) en más de 50 países, lo que hace que se liberen al suelo, el aire y el agua varios cientos de toneladas de Hg [44].

Por otra parte, la recuperación de metales preciosos recuperados a partir de la chatarra electrónica ya que cada teléfono móvil tiene una placa de circuito impreso con una concentración significativa de oro, plata y paladio. Una lixiviación con ácido sulfúrico, para disolver primero elementos como el cobre para reducir el consumo de tiourea. Sin embargo, además del cobre, la plata también se disolverá durante una lixiviación con ácido sulfúrico oxidativo [39].

En los últimos años, la lixiviación con cianuro ha sido prohibida en muchas regiones debido a preocupaciones ambientales. Esto se debe predominantemente a la toxicidad aguda del cianuro, demostrada efectivamente por la reciente ruptura de la presa de relaves de Bahía Mare y la posterior contaminación del río Tisza en Rumania. Además, pueden producirse problemas al lixiviar el oro de minerales complejos, como los que contienen cobre o material carbonoso [38]. El uso de alternativas lixiviantes para la extracción de oro se ha investigado durante algún tiempo y se ha analizado en numerosas revisiones. Un reemplazo adecuado para el cianuro puede ser el uso de tiosulfato en presencia de amoníaco y cobre (II). Las ventajas de utilizar este enfoque incluyen una posibilidad mucho menor de un impacto ambiental adverso, una operación más rentable debido al hecho de que el tiosulfato es sustancialmente menos costoso que el cianuro, y el tiosulfato facilita la lixiviación de materiales complejos que incluyen minerales manganíferos a través de la degradación de la matriz. Además, el anión tiosulfato es un lixivante más eficaz de los minerales de alto rendimiento y alto contenido de cobre a través de la lixiviación en pilas que el cianuro. En comparación con el procesamiento de cianuro convencional, el proceso de tiosulfato a menudo tiene las ventajas de una mayor eficiencia y versatilidad, junto con un impacto ambiental significativamente menor. Los licores de tiosulfato son menos propensos a

ensuciarse con iones metálicos no deseados y, por lo tanto, pueden aplicarse a una amplia gama de minerales refractarios. Las sales de tiosulfato comunes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$ ) son biodegradables y son consideradas no peligrosas [38]. El hidrometalurgia se ha utilizado ampliamente para la recuperación de oro de chatarra electrónica e incluye resina de intercambio de iones de adsorción extracción por solvente y precipitado de oro con reactivos reducidos. Sin embargo, estos procesos de recuperación actuales requieren mucho trabajo y tiempo a un alto costo. Además, se genera una gran cantidad de residuos secundarios, como resultado de la adición de agentes químicos para la precipitación y la reducción de los procesos [40].

## **II.5.2 Recuperación de Platino por Métodos No Tradicionales**

El platino es uno de los metales preciosos más valiosos debido a su amplia utilización en diversas aplicaciones industriales, como convertidores catalíticos, termopares, joyería, soluciones de galvanoplastia y equipos de laboratorio [41]. Existen numerosos estudios en la literatura sobre la recuperación y separación selectiva de metales preciosos. Los métodos para remover iones metálicos de soluciones de efluentes incluyen la precipitación, cementación, intercambio iónico y adsorción. Tanto la precipitación como la cementación resultan en una alta eficiencia, aunque no suelen garantizar una purificación completa, lo que requiere tratamientos adicionales. El intercambio iónico es eficiente en la recuperación de iones metálicos, pero no es un método rentable. Por otro lado, la adsorción sobre carbón activado ha sido ampliamente investigada en las últimas dos décadas debido a su facilidad de uso y capacidad de regeneración [41].

La recuperación de platino también ha sido estudiada a partir de catalizadores gastados de reformado e isomerización. En un enfoque, se realizó una disolución selectiva de metales básicos en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 50%, seguido del tratamiento del residuo insoluble con agua regia para recuperar el platino. Otra técnica consistió en la recuperación de platino de un catalizador de aluminosilicato gastado mediante suspensión en ácido sulfúrico, obteniendo una solución de sulfato de aluminio y un residuo de platino. Además, el platino fue recuperado mediante lixiviación con ácido clorhídrico concentrado, seguido de tratamiento con gas cloro a  $95^\circ\text{C}$  para disolver el metal [42]. El estado iónico del platino en soluciones de cloruro varía en función de la acidez del medio, la concentración de iones cloruro y la temperatura [45].

Otro método destacado es el uso de quitosano para la sorción de platino, proceso que se lleva a cabo en medios ácidos. Para mejorar la estabilidad del quitosano, es necesario aplicarle un tratamiento de reticulación [43]

## **2.6 Concepto de lixiviación**

La lixiviación, también conocida como extracción sólido-líquido, es un proceso en el cual un disolvente líquido se hace pasar a través de un sólido pulverizado, lo que permite la disolución de uno o más de los componentes solubles presentes en dicho sólido [4]

### **II.6.1 Teorías de lixiviación**

El cianuro es el reactivo químico más utilizado a nivel mundial para la recuperación de metales preciosos. El proceso de cianuración de la plata consiste en disolver el metal en una solución aireada de cianuro de sodio, formando un complejo  $[Ag(CN)_2]^-$  que luego se recupera mediante la adición de polvo de zinc. Este proceso, conocido como cementación, implica la reducción de los iones metálicos en solución a partir de la adición de otro metal, y es considerada una de las primeras técnicas hidrometalúrgicas exitosas para la recuperación de metales en su estado elemental o a partir de soluciones [2].

Sin embargo, el cianuro también es uno de los reactivos más tóxicos, con graves consecuencias ambientales. Los altos niveles de contaminación y su impacto en la salud humana han llevado a un creciente rechazo y prohibición de su uso en diversas partes del mundo [2]. Esto ha generado un fuerte interés en la industria por encontrar alternativas más amigables con el medio ambiente [11]. Además, el cianuro resulta poco efectivo para disolver metales preciosos en minerales refractarios, donde las bajas recuperaciones metálicas motivan la búsqueda de reactivos más selectivos.

Uno de los métodos propuestos es el uso de tiosulfatos ( $S_2O_3^{2-}$ ), que son considerados una alternativa no tóxica al proceso convencional de cianuración y resultan efectivos en la disolución de metales preciosos en minerales refractarios [2]. El proceso de lixiviación con tiosulfato de sodio es complejo y depende de la estabilización del complejo cuprotetramina, ya que el tiosulfato es una especie química inestable que puede transformarse en diferentes politionatos [12]. No obstante, la química y la cinética de este proceso aún presentan grandes desafíos en la metalurgia y se han realizado pocas investigaciones al respecto. Estudios han explorado la estequiometría de la reacción de disolución de la plata en sistemas con tiosulfato, encontrando que la disolución del metal alcanza aproximadamente el 50% en 240 minutos, con la presión parcial de oxígeno y la concentración de tiosulfato como factores clave en la velocidad del proceso [4].

Desde hace décadas, la pequeña minería en Zacatecas ha empleado tiosulfato, lo que sugiere que esta técnica podría ser una alternativa viable a la cianuración tradicional [11]. El presente proyecto tiene como objetivo estudiar la cinética de disolución del oro y la plata contenidos en concentrados provenientes de la flotación de jales minerales, utilizando el sistema  $O_2-S_2O_3^{2-}$  como alternativa a la cianuración.

El estudio se centrará en parámetros fundamentales como la presión parcial de oxígeno, la concentración de tiosulfato,  $Cu^{2+}$ ,  $H_3O^+$  y la temperatura, con el objetivo de determinar una expresión cinética de la velocidad de disolución de oro y plata en los concentrados minerales. Además, se busca formular una ecuación química que represente la estequiometría de la reacción. Se espera que la presencia de  $Cu^{2+}$  actúe como catalizador, acelerando la disolución de los metales preciosos, como sugieren estudios previos [5]. De tener éxito, este proyecto no solo ofrecería beneficios por la recuperación de oro y plata, sino que también podría generar suficiente conocimiento científico para patentar el proceso de lixiviación con el sistema  $O_2-S_2O_3^{2-}$ .

## II.6.2 Métodos Tradicionales de Lixiviación

La cianuración es el método más utilizado a nivel mundial para la recuperación de metales preciosos. Sin embargo, el agotamiento de los depósitos fácilmente lixiviables y el aumento en los precios del oro y la plata han obligado a la industria minera a procesar minerales más

complejos que, en muchos casos, resultan ser refractarios al cianuro. Los minerales refractarios son aquellos en los que la recuperación de oro o plata es inferior al 80% mediante la cianuración convencional.

Los minerales que contienen oro y plata se clasifican generalmente como de molienda libre o refractarios, dependiendo de su respuesta metalúrgica a la lixiviación con cianuro. A medida que los recursos de molienda libre se agotan rápidamente, uno de los principales desafíos de la industria es desarrollar procesos eficientes para extraer estos metales preciosos de minerales refractarios. La refractariedad de los minerales de plata, por ejemplo, se debe principalmente a características propias, como la fijación de la plata con el azufre, la presencia de inclusiones, o el isomorfismo en los minerales que la contienen, así como la mineralogía reactiva.

En el caso de los minerales refractarios, el simple uso de cianuro no es suficiente, y se requiere un pretratamiento oxidativo para liberar los metales. Entre los pretratamientos más comunes se encuentran el tostado, la oxidación biológica y la oxidación a presión. Sin embargo, estos procesos suelen estar asociados con altos costos, tiempos de procesamiento prolongados o problemas ambientales, como la generación de gases tóxicos ( $\text{SO}_2$  y  $\text{As}_2\text{O}_3$ )

Actualmente, muchas investigaciones se centran en el uso de reductores en el pretratamiento por lixiviación reductiva. Algunos de los reductores estudiados incluyen dióxido de azufre, sulfito de sodio [16], reductores orgánicos, polvo de hierro metálico y sulfato ferroso, entre otros [

Aunque el proceso pirometalúrgico, que requiere un alto consumo energético, ha sido habitualmente empleado, este genera una contaminación ambiental considerable. Por ello, el proceso hidrometalúrgico ha demostrado ser más eficiente y dominante en el tratamiento de minerales. Para los minerales de plata-manganeso, los procesos hidrometalúrgicos reportados se dividen en procesos de una o dos etapas. El proceso de una etapa consiste en la lixiviación simultánea de manganeso y plata, eficaz solo para minerales con un alto contenido de plata. Por otro lado, el proceso de dos etapas utiliza una lixiviación sulfatante reductora para disolver los minerales de manganeso y ha sido ampliamente aplicada en el tratamiento de estos minerales complejos.

## 2.7 Familia Tío

Se ha comprobado que la lixiviación de la plata con compuestos orgánicos que contienen el grupo TIO (Figura 7), tales como la tiourea  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ , el tiosulfato  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ , el tiocianato  $[\text{SCN}]^-$ , y la tiosemicarbazida  $\text{CH}_5\text{N}_3\text{O}$ , Ofrece ciertas ventajas frente a la cianuración. Estas ventajas incluyen la posibilidad de realizar la disolución bajo condiciones ácidas y emplear agentes oxidantes fuertes. Además, los valores metálicos pueden recuperarse mediante adsorción o precipitación, y estos reactivos presentan una menor toxicidad, lo que reduce los problemas ambientales asociados.

El tiosulfato es el lixiviante de la familia TIO que ha sido más estudiado. Por ello, en este trabajo se llevará a cabo un análisis cinético del comportamiento de los tiosulfatos en el proceso de recuperación de plata, bajo condiciones ácidas y oxidantes, con el fin de determinar las condiciones óptimas para la recuperación de este metal precioso. Además, el desarrollo de este proyecto busca alternativas al cianuro como reactivo lixivante. Los procesos basados en la lixiviación con compuestos de la familia TIO son considerados una alternativa no tóxica al proceso de cianuración convencional, y por ello, se plantea su evaluación como una opción más amigable con el medio ambiente.

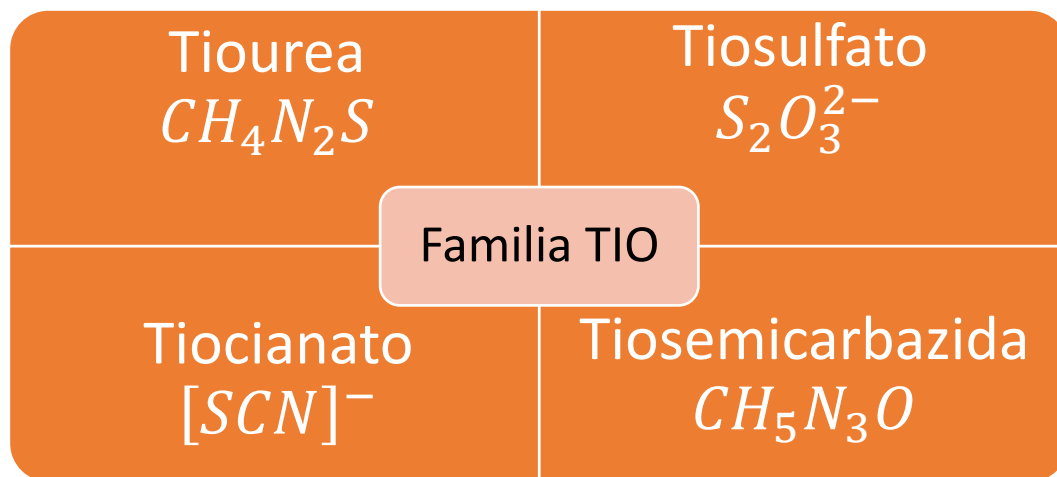


Figura 7 Complejantes de la Familia TIO

## 2.8 Sistemas de Lixiviación con Tiosulfatos

Los sistemas de lixiviación con tiosulfatos son considerados una alternativa no tóxica al proceso convencional de cianuración y resultan particularmente efectivos para la disolución de minerales refractarios. Una de las principales ventajas de este método, en comparación con el uso de cianuro, es su mayor selectividad para extraer plata contenida en fases refractarias. Sin embargo, una de las desventajas es la baja estabilidad del ion tiosulfato.

La lixiviación con soluciones de tiosulfato ha sido principalmente estudiada para minerales refractarios. En este sentido, Berozowky y Sefton (1979) fueron pioneros en investigar la lixiviación de plata, logrando recuperaciones de hasta un 83% de Ag utilizando tiosulfato de amonio en concentrados de cobre que contenían oro y plata. Además, Briones y Lapidus

(1998) realizaron estudios sobre la lixiviación de un concentrado de azufre de plata en Argentina, utilizando soluciones de tiosulfato en presencia de cobre, y observaron que el ion cúprico reacciona con el tiosulfato para formar el ion tetrionato y tiosulfato cúprico.

Aunque el cianuro sódico es el agente más utilizado en la lixiviación de oro (Au), gracias a su gran capacidad de complejar este metal y su uso junto con oxígeno como oxidante, también es muy tóxico para el medio ambiente. Si bien es un lixivante enérgico para el oro y la plata, su selectividad es limitada, ya que forma complejos con numerosos iones

metálicos. Este hecho ha impulsado la búsqueda de alternativas más seguras y eficientes al cianuro, tanto para reducir el impacto ambiental como para mejorar la velocidad de disolución del oro. A pesar de esto, a nivel industrial, muy pocos reactivos distintos al cianuro han sido implementados de manera efectiva para la recuperación de Au.

La cinética de disolución del oro con soluciones de tiosulfato de sodio fue estudiada por Bagdasaryan KA y su equipo, quienes determinaron que la velocidad de disolución del oro con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  aumenta linealmente con el incremento de la temperatura, en un rango de  $45^\circ\text{C}$  a  $85^\circ\text{C}$ . Sin embargo, este fenómeno también contribuye a la descomposición del tiosulfato, recomendándose una temperatura óptima entre  $65^\circ\text{C}$  y  $75^\circ\text{C}$ . A temperaturas superiores a  $65^\circ\text{C}$  y hasta  $100^\circ\text{C}$ , la disolución del oro se ve inhibida por la formación de películas finas de azufre de cobre, lo que reduce su eficiencia.

### **II.8.1 Lixiviación con Tiosulfatos**

Los inconvenientes ambientales y de seguridad asociados a las técnicas convencionales de cianuración en la producción de oro han motivado la búsqueda de lixiviantes alternativos. Entre los más investigados se encuentran el cloruro, la tiourea y el tiosulfato. Aunque el cloruro permite una extracción eficiente de oro, su aplicación industrial se ve limitada por los altos requerimientos de resistencia a la corrosión en los reactores, las condiciones laborales peligrosas y su baja selectividad (Hasab et al., 2013, 2014). Por otro lado, la lixiviación con tiourea es costosa debido a su elevado precio y alto consumo, además de ser potencialmente carcinógena (Öncel et al., 2005; Örgül y Atalay, 2002). En comparación, la lixiviación con tiosulfato presenta varias ventajas, como una buena selectividad de reacción, menores riesgos ambientales y una inversión moderada (Feng y Van Deventer, 2011).

El uso de tiosulfatos en combinación con amoníaco y cobre (II) ha sido propuesto como una alternativa viable a la cianuración. Numerosos estudios han investigado esta técnica (Aylmore y Muir, 2001; Grosse et al., 2003; Muir y Aylmore, 2004). No obstante, la comercialización del proceso aún enfrenta obstáculos, principalmente el alto consumo de tiosulfato y los desafíos para la recuperación del oro tras la lixiviación (Muir y Aylmore, 2004; Hilson y Monhemius, 2006). Un aspecto complicado es la química del sistema de lixiviación, debido a la presencia simultánea de ligandos complejos (amoníaco y tiosulfatos), la estabilidad del tiosulfato y el sistema redox  $\text{Cu (II)-Cu (I)}$ .

La lixiviación de oro y plata con tiosulfato ha sido objeto de numerosos estudios, y se considera una alternativa más ecológica frente a la cianuración convencional. Las investigaciones recientes han demostrado que las soluciones de tiosulfato-cobre-amoníaco pueden recuperar metales preciosos de minerales sulfurados en aproximadamente 48 horas. Sin embargo, el mecanismo de reacción es complejo. El tiosulfato actúa como agente complejante, mientras que los iones cúpricos ( $\text{Cu}^{2+}$ ) son los oxidantes del oro y la plata, y el amoníaco estabiliza los iones cúpricos impidiendo su reducción. En la lixiviación de azufre de plata, se produce una reacción de sustitución entre los iones cúpricos o cuprosos y la plata, formando complejos de tiosulfato-plata.

Aylmore y Muir (2001) señalan que la disolución del oro en sistemas de tiosulfatos puede verse inhibida por la formación de capas de sulfuro, un fenómeno relacionado con la ausencia de hidróxido amónico y la descomposición oxidativa del tiosulfato. Se ha observado que las especies de amonio se adsorben sobre la superficie del oro, evitando su pasivación. Sin

embargo, el hidróxido de amonio tiene un impacto ambiental negativo, por lo que Fuentes-Aceituno et al. (2005) intentaron reemplazarlo por sosa cáustica (NaOH) en soluciones de tiosulfato-cobre-EDTA, obteniendo una cinética de lixiviación de plata más lenta en comparación con el  $\text{NH}_4\text{OH}$ .

El efecto catalítico de los iones cúpricos en la solución de tiosulfato-cobre-amoniaco aumenta hasta 20 veces la velocidad de lixiviación de oro y plata, debido a la formación de un complejo de tetraamina cúprica  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}]$ . Sin embargo, concentraciones excesivas de iones cúpricos pueden promover la degradación del tiosulfato en politionatos, lo que afecta negativamente la recuperación de metales preciosos y la rentabilidad del proceso. Además, el amoniaco desempeña un papel crucial en la cinética de lixiviación, ya que su ausencia puede resultar en la formación de capas de azufre sobre los metales preciosos, inhibiendo la disolución.

Aunque el proceso de lixiviación con tiosulfatos presenta ventajas sobre el cianuro, como la reducción de la interferencia de cationes no deseados y un menor impacto ambiental (Abbruzzese et al., 1995), el tiosulfato es un anión metaestable que se descompone fácilmente en solución química, lo que puede llevar a la formación de diversas especies de azufre, como polisulfuros, politionatos y azufre elemental, y aumentar el consumo de tiosulfato.

A pesar de su potencial, la lixiviación con tiosulfato no ha sido ampliamente adoptada en la industria debido a su alto consumo de tiosulfato y la pasivación del oro. La disolución de minerales asociados durante el proceso también puede afectar la eficacia de la lixiviación. La investigación sobre la aplicación de tiosulfato cuproso para la lixiviación de mercurio en sulfuros es aún limitada.

## **2.9 Consideraciones Cinéticas en Lixiviación**

La información termodinámica es clave para determinar la posición de equilibrio de una reacción y las energías involucradas en cualquier transformación química. En términos de ingeniería de procesos, esta información suele ser suficiente para reacciones rápidas, como muchas de las que ocurren a altas temperaturas. Sin embargo, en muchos procesos de relevancia, especialmente en hidrometalurgia, las reacciones se llevan a cabo a velocidades bajas o moderadas. En estos casos, la información cinética es fundamental para el diseño adecuado de los procesos que involucran reacciones heterogéneas.

### **II.9.1 Efecto de la concentración**

Diversas pruebas sugieren que el efecto de la concentración en reacciones heterogéneas es notable en condiciones extremas. A concentraciones muy bajas, la difusión es lenta, lo que indica que el proceso está controlado por difusión. En el otro extremo, a concentraciones muy elevadas, la difusión ocurre más rápidamente y la reacción química se convierte en la etapa limitante del proceso.

### **II.9.2 Efecto del Área Superficial**

El área de la interfaz, al igual que otros factores, influye directamente en la velocidad de reacción. Un aumento en el área incrementa el número de sitios activos, lo que acelera la reacción. En las reacciones que involucran sólidos, la reducción del tamaño de partícula incrementa la velocidad de reacción. Además, la geometría de la interfaz es crucial, ya que

condiciona cómo evoluciona el área durante la reacción. Bajo condiciones constantes, las partículas con geometría laminar reaccionan más rápidamente en comparación con las de formas isométricas.

## **2.10 Tipos de Yacimientos de Litio**

El litio se extrae principalmente a partir de tres tipos de depósitos: salmueras, pegmatitas y rocas sedimentarias.

### **II.10.1 Salmueras**

Los depósitos de salmuera representan aproximadamente el 66% de los recursos de litio a nivel mundial y se encuentran en grandes salinas ubicadas en Chile, Argentina, China y el Tíbet. La composición de estas salmueras varía significativamente en cuanto a los niveles de litio y la presencia de otros elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos. Debido a estas variaciones, cada salmuera debe ser tratada de manera particular según su composición específica.

En general, la extracción de litio a partir de salmueras ha demostrado ser más rentable que su producción a partir de minerales de roca dura (pegmatitas). Aunque la producción de litio de roca dura dominó el mercado en el pasado, en la actualidad la mayor parte del carbonato de litio se produce a partir de salmueras continentales, principalmente debido a los menores costos de producción asociados.

#### **II.10.1.1 Tipos de Depósitos de Salmuera para la Extracción de Litio**

##### **II.10.1.1.1 Depósitos de Salmuera**

Existen tres tipos principales de depósitos de salmuera: continentales, geotérmicos y en campos petrolíferos. El más común de estos son las cuencas continentales de desiertos salinos, también conocidos como lagos de sal, salinas o salares. Estas formaciones se encuentran cerca de áreas volcánicas y están compuestas por arena, minerales y agua con altas concentraciones de sales disueltas. Como se muestra en la Figura 8



**Figura 8 Deposito de salmuera**

### II.10.1.1.2 Salmueras Continentales

Las salmueras continentales, mostradas en la figura 9, son la forma más común de salmuera que contiene litio y representan la mayor parte de la producción mundial de litio. Un ejemplo destacado es el Salar de Atacama en Chile, que abarca unos 3,000 kilómetros cuadrados y contiene una concentración de litio promedio de aproximadamente 0.14%, la más alta conocida. Los recursos de litio en esta área se estiman en 6.3 millones de toneladas. Dos de los principales productores de litio a nivel mundial, Sociedad Química y Minera (NYSE: SQM) y Rockwood Holdings (NYSE: ROC), operan en el Salar de Atacama, que produce más de la mitad del litio consumido en el mundo.



Figura 9 Deposito de salmuera continental

### II.10.1.1.3 Salmueras Geotérmicas

Las salmueras geotérmicas representan el 3% de los recursos mundiales conocidos de litio. Estas soluciones salinas calientes y concentradas circulan a través de las rocas de la corteza terrestre en áreas con alto flujo de calor, como se ve en la figura 10, enriquecidas con elementos como litio, boro y potasio. Ejemplos de yacimientos de salmueras geotérmicas incluyen Wairakei en Nueva Zelanda, el campo de Reykanes en Islandia y El Tatio en Chile.



Figura 10 Deposito de salmuera geotérmicas

El Mar de Salton en el sur de California es el ejemplo más conocido de una salmuera geotérmica rica en litio. Una empresa privada con sede en California, produce carbonato de litio de alta pureza a partir de salmueras descargadas de una planta de energía geotérmica que opera en el Mar de Salton. Utilizando un proceso de ósmosis inversa, eliminan la necesidad de evaporación solar, haciendo sus operaciones más rentables. Simbol Materials espera aumentar su producción de 8,000 toneladas anuales a 64,000 toneladas para el año 2020.

## **II.10.2 Salmueras de Campos Petrolíferos y Depósitos de Pegmatita**

### **II.10.2.1 Salmueras de Campos Petrolíferos**

Las salmueras de litio enriquecido también se pueden encontrar en algunos yacimientos profundos de petróleo, representando el 3% de los recursos mundiales conocidos. Estas salmueras están presentes en regiones como Dakota del Norte, Wyoming, Oklahoma, Arkansas y el este de Texas, con concentraciones de litio que pueden alcanzar hasta 700 mg/l, según el geólogo Keith Evans.

### **II.10.3 Depósitos de Pegmatita o “Roca Dura”**

La pegmatita es una roca ígnea intrusiva de grano grueso, formada a partir de magma cristalizado en el interior de la corteza terrestre, que puede contener cantidades extraíbles de varios elementos, incluyendo litio, estaño, tantalito y niobio. Este tipo de depósito representa el 26% de los recursos mundiales conocidos de litio. El mineral de roca dura que contiene litio se extrae mediante la explotación de minas a cielo abierto o subterránea, utilizando técnicas mineras tradicionales. Posteriormente, el mineral se procesa y concentra utilizando una variedad de métodos antes de su uso directo o su transformación en compuestos de litio.

El procedimiento para la extracción de litio de pegmatita o mineral de roca dura es costoso, lo que coloca a estos depósitos en desventaja en comparación con los depósitos de salmuera. Sin embargo, la concentración de litio en las pegmatitas es considerablemente más alta que en las salmueras, lo que hace que depósitos con valores extremadamente altos de litio puedan ser económicamente viables. Además, la producción de otros recursos, como el estaño y el tantalito, puede ayudar a compensar los costos de procesamiento.

El litio en las pegmatitas se encuentra más comúnmente en el mineral espodumena, aunque también puede estar presente en petalita, lepidolita, amblygonita y eucryptita. Alaska, el norte de Ontario, Quebec, Irlanda y Finlandia son conocidas por sus yacimientos de litio en pegmatitas. Uno de los principales yacimientos con estas características se encuentra en Greenbushes, Australia, con un recurso estimado de 560,000 toneladas de mineral de litio y una concentración media de alrededor del 1.6%.

### **II.10.4 Rocas Sedimentarias que Contienen Litio**

Los depósitos en rocas sedimentarias representan el 8% de los recursos mundiales conocidos de litio y se encuentran en depósitos de arcilla y en rocas evaporitas lacustres.

### II.10.5 Depósitos de Arcilla

En los depósitos de arcilla, el litio forma parte de la estructura cristalina, como se muestra en la figura 11 y se encuentra principalmente en el mineral esmectita. La forma más común de esmectita es la hectorita ( $\text{Na}_0.3(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ ), rica en magnesio y litio. Este mineral recibe su nombre de un depósito que contiene 0.7% de litio, localizado en Héctor, California. Kings Valley, Nevada, alberga otro depósito de hectorita con un estimado de 48.1 millones de toneladas como recursos indicados y 42.3 millones de toneladas de recursos inferidos, con una ley 0.27% de litio. Además, el litio en las arcillas puede resultar de un enriquecimiento secundario debido al movimiento de aguas termales subterráneas.



*Figura 11 Deposito Arcilla*

### II.10.6 Evaporitas Lacustres

La forma más conocida de un depósito lacustre que contiene litio se encuentra en el valle de Jadar, en Serbia, donde se encuentra el mineral jadarita, compuesto por sodio, litio, boro, silicio, hidrógeno y oxígeno. Este depósito es propiedad del gigante minero Rio Tinto y se estima que contiene un recurso inferido de 125.3 millones de toneladas de jadarita, con un contenido de óxido de litio del 1.8%. Actualmente, el proyecto está en la etapa de exploración, pero la compañía cree que este yacimiento “es una de las fuentes más grandes de litio desarrolladas en el mundo, con el potencial de suministrar más del 20% de la demanda mundial de litio.”

## 2.11 Procesos de extracción del litio

### Métodos de Obtención de Litio: Pegmatitas y Salmueras Proceso productivo

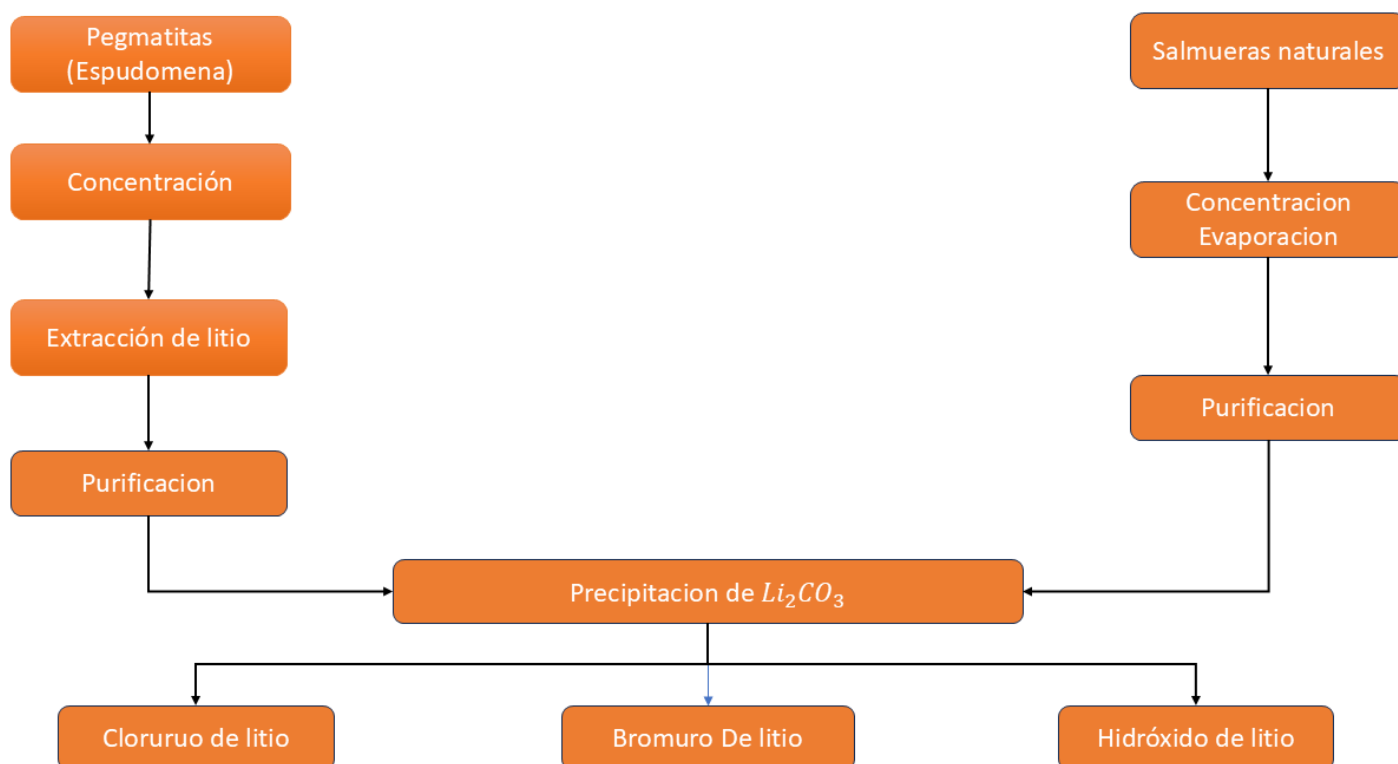


Figura 12 Proceso productivo del litio

Si bien es cierto que el litio se encuentra presente en pegmatitas, salmueras, pozos petrolíferos, campos geotérmicos, arcillas e incluso en los océanos, en la actualidad solo dos métodos de obtención han demostrado ser económicamente viables: mediante salmueras y pegmatitas.

#### II.11.1 Obtención a partir de Pegmatitas o Depósitos de “Roca Dura”

La espodomena fue la fuente principal de obtención de carbonato de litio hasta que se inició la explotación del litio contenido en salmueras naturales. El mineral de espodomena se concentra por flotación diferencial para obtener un concentrado con un contenido de 2.5 a 3.2% de litio, lo que equivale a un 85 a 95% de espodomena. Para la producción de litio a partir de espodomena natural, el concentrado debe ser calcinado previamente con caliza. Posteriormente, mediante procesos de molienda, lixiviación, precipitaciones sucesivas y

otros métodos, y dependiendo del agente tratante, se puede extraer un alto porcentaje de litio, produciendo hidróxido de litio, carbonato de litio o cloruro de litio.

### II.11.2 Obtención a partir de Salmueras

El desarrollo del proceso de recuperación del litio a partir de salmueras tuvo un fuerte impacto en la industria, constituyendo una fuente de litio con costos mucho más bajos en comparación con la obtención de litio a partir de minerales pegmatíticos. La composición de las salmueras varía considerablemente en cuanto a los niveles de contenido de litio y la presencia de otros elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos. Esto requiere que cada salmuera sea tratada de acuerdo a su composición específica.

De manera general, las etapas de este proceso son las siguientes: la salmuera es bombeada a estanques de baja profundidad y dimensiones considerables, donde, a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a precipitarse secuencialmente un conjunto de sales. De este modo, se extraen sales como cloruro de potasio, cloruro de sodio y sulfato de potasio, como es mostrado en la figura 13

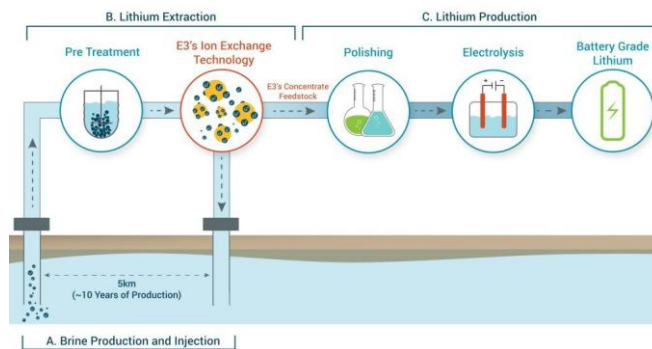


Figura 13 Obtención de litio a partir de salmuera

### II.11.3 Proceso de Obtención de Litio a partir de Salmueras geotérmicas

Las salmueras también contienen otros elementos como sodio, así como impurezas de magnesio, boro y sulfato. Posteriormente, la salmuera concentrada de litio se transporta a las plantas de procesamiento en camiones, donde es sometida a diversos procesos de purificación y precipitación para obtener carbonato de litio con una pureza cercana al 99.5%. Aunque el mercado exige un mínimo de 99.1%, este puede comercializarse en forma de cristales o comprimirse en gránulos para su venta. El carbonato de litio actúa como materia prima para la producción de hidróxido de litio o cloruro de litio de alta pureza, que se emplean en la obtención de litio metálico mediante electrólisis de sales fundidas.

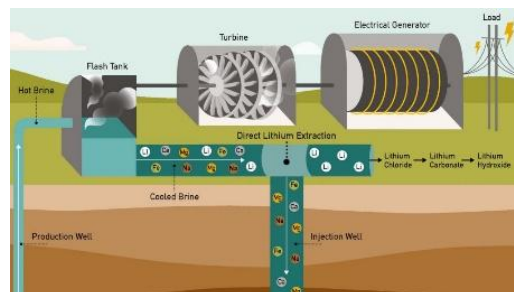


Figura 14 Obtención de litio a partir de salmuera geotérmicas

## 2.12 Principales Usos

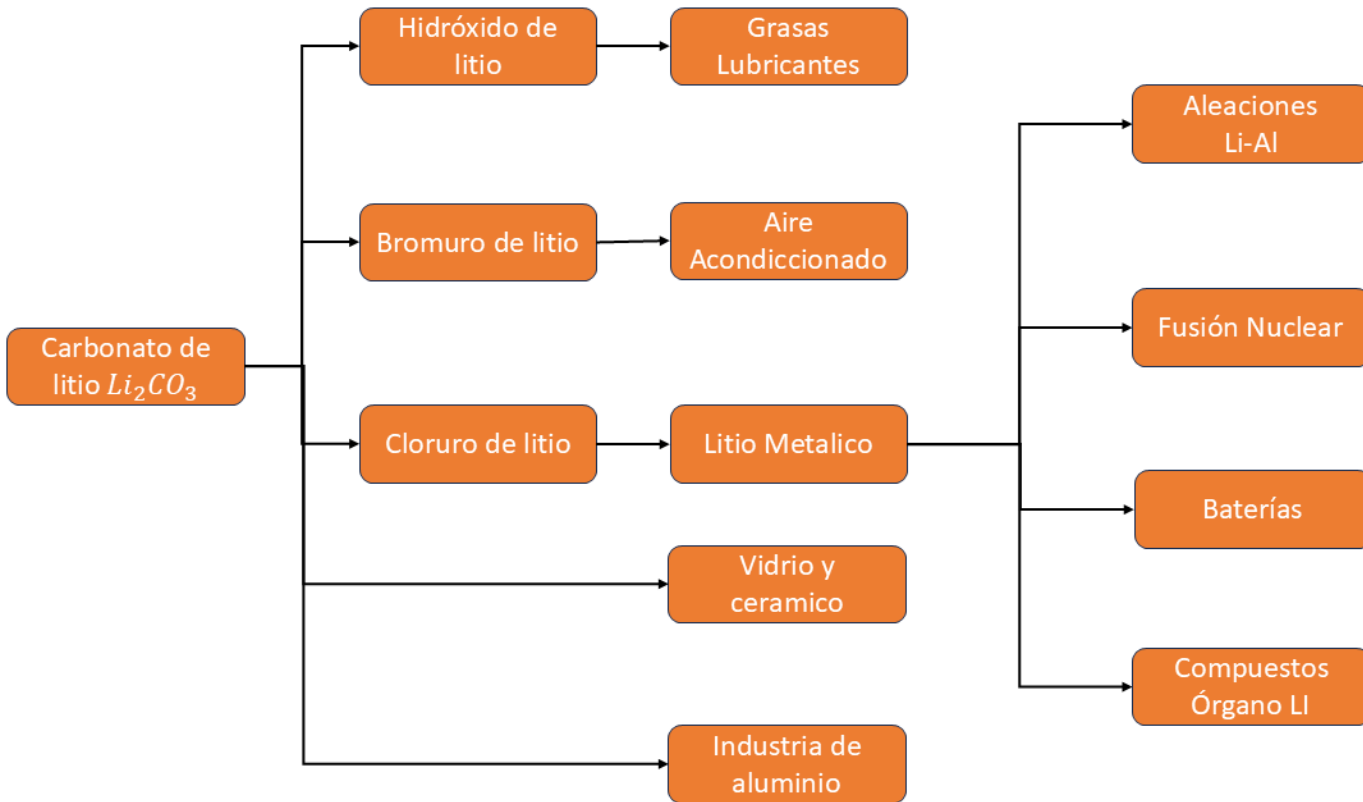


Figura 15 Principales Usos del litio

## 2.13 EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS EXTRACTIVOS DE LITIO

Una fuente primaria, es aquella cuyo origen es natural y geológico, es decir que aún no se ha visto relacionada con la actividad humana. A los minerales que cuentan, en este caso, con cierto contenido de litio que justifica su explotación y procesamiento como una operación rentable, se les denomina mena Kesler, 2018; Sillitoe, 2010).

A nivel mundial se pueden distinguir tres fuentes extractivas primarias de litio, la más popular en el mercado debido a que está conformada por especies minerales mucho más reactivas que facilitan la precipitación de litio, son las salmueras que representan el 66% de los depósitos a nivel mundial [Qu et al., 2017). No obstante, las pegmatitas, que son un tipo de roca ígnea que se forma a partir de la cristalización del magma y que se distinguen por sus

grandes cristales asociados al contenido de cuarzo, feldespato y micas, representan el 26% de los depósitos de litio y pese a que cuentan con menor distribución a nivel mundial, contienen minerales como la espodumena, ambligonita, lepidolita y petalita que pertenecen a la familia de los inosilicatos y filosilicatos, diferenciándose principalmente por la configuración que tienen los silicatos al formar ciertos cristales, y cuyo contenido de litio supera el reportado en las salmuera y rocas sedimentarias (Smith et al., 2019; Turner, 2020).

Aunque experimentalmente, ya se han estudiado propuestas para la extracción de litio a partir de baterías, países como México que, se encuentran incursionado en el mercado del litio a nivel mundial como productores de la materia prima de estas baterías, aún requieren estudiar la vías extractivas para fuentes primarias, ya que cuenta con tres yacimientos de interés económico que se ubican en Baja California, San Luis potosí-Zacatecas y Sonora, por lo que al menos dos de estos depósitos se encuentran relacionados con rocas sedimentarias y pegmatitas (Williams et al., 2018; Secretaría de Economía de México, 2022).

### ***Los antecedentes***

La extracción de litio ha evolucionado significativamente a lo largo de las décadas, impulsada por la creciente demanda de baterías de iones de litio para aplicaciones en tecnologías limpias y movilidad eléctrica. La espodumena, un mineral clave en esta industria, ha sido objeto de numerosos estudios para mejorar su procesamiento y eficiencia en la extracción de litio. Uno de los pioneros en procesamiento de minerales pegmatíticos fue Botto et al. en 1985 que llevaron a cabo un estudio fundamental sobre la transformación térmica de la espodumena natural. El proceso de tratamiento térmico a aproximadamente 1080 °C convirtió la espodumena en su forma  $\beta$ , una fase cristalina más reactiva que facilita el intercambio iónico del litio, logrando disolverse con mayor eficiencia en el medio seleccionado. Los polvos residuales de esta calcinación fueron posteriormente tratados con ácido sulfúrico concentrado a cerca de 250 °C. Esta digestión con ácido permitió una efectiva lixiviación de litio, demostrando que la conversión a  $\beta$ -espodumena es crucial para optimizar la extracción de este metal valioso. Además, el estudio de Botto et al. identificó que, a altas temperaturas, la espodumena también puede adoptar la fase  $\gamma$  hexagonal, esta fase, a veces denominada  $\gamma$ -espodumena, es un derivado del cuarzo  $\beta$  y también tiene implicaciones importantes para la extracción de litio. Más tarde, en 1897, Gasalla et al. realizaron investigaciones utilizando técnicas avanzadas para caracterizar la espodumena. Aplicaron difracción de rayos X (DRX), espectroscopía infrarroja (IR), análisis térmico diferencial (TGA) y microscopía electrónica de barrido (MEB) para estudiar una muestra de  $\alpha$ -espodumena sometida a molienda de impacto y fricción, logrando caracterizar a profundidad la muestra, tanto química como mineralógicamente. En este estudio se redujo el tamaño de las partículas y aumentó su área superficial, lo que, a su vez incrementó la reactividad del mineral en ambientes ácidos. Esto quiere decir que procesar los minerales mediante un ciclo de trituración y molienda adecuado, permite acelerar la manera en la que los sólidos minerales interactúan con la solución (el medio de lixiviación). Pensemos en una barra de chocolate que deseamos disolver en una olla con leche, si esa barra es trozada en partes más pequeñas o incluso pulverizada, la disolución del chocolate se realizara mucho más rápido en relación a lo pequeño que resulte el tamaño de partícula. Esta propiedad es de suma importancia en el estudio de materiales ya que asegura una mayor área de contacto al reaccionar con medios líquidos o gaseosos.

En 2002, Souza S. O. D. extendió la investigación sobre la influencia del tratamiento térmico en otros minerales relacionados. Su estudio se centró en la kunzita, una variedad de

espodumena con tonos lilas y rosado que delatan la presencia de litio en el cristal, sometida a temperaturas entre 500 y 900 °C. Los análisis por difracción de rayos X revelaron que estos tratamientos térmicos afectan la estructura cristalina de la kunzita, produciendo un reordenamiento en los planos de reflexión y tamaño de grano. Souza encontró que la desvitrificación a altas temperaturas produce espodumena artificial con una variedad de ordenamiento en la red cristalina, en otras palabras, la  $\beta$ -espodumena es una especie que no existe en la naturaleza, por lo que se le puede clasificar como un mineral secundario. El proceso de calcinación es comúnmente utilizado en la industria mineral para alterar la estructura de los minerales e incluso propiciar la separación de ciertos elementos, resultando en sólidos que son mucho más sencillos de fundir o disolver.

El procesamiento de espodumena continuo con el trabajo de Rosales et al. en 2014, quienes investigaron la disolución de litio a partir de  $\beta$ -espodumena utilizando ácido fluorhídrico, un ácido sumamente reactivo que tiene la capacidad de disolver silicatos, por lo que incluso, las pruebas experimentales realizadas con este reactivo, requiere de materiales plásticos para contener el medio de disolución. Este estudio logró una extracción del 90% de litio, una tasa de disolución bastante alta considerando la complejidad estructural de la espodumena. Aunque pareciera el medio de disolución ideal, pretender escalar estos procedimientos a un ámbito industrial, nos lleva a cuestionarnos sobre las condiciones de seguridad de los operarios y los requerimientos, en cuanto a reparación y mantenimiento, que deben tener los tanques donde se realice la disolución. Tratándose de HF, se establece que dichos tanques y resto conexiones deben ser resistente a la corrosión, por lo que irremediablemente, devendrá en un incremento de costos de operación. Algunas otras condiciones que permitieron la alta tasa de disolución fueron el manejo a 75 °C, una concentración de HF de 7%, una velocidad de agitación de 330 rpm y un tiempo de reacción de 20 minutos. Consideremos el ejemplo de la leche con chocolate nuevamente, en cuanto a la variable de la temperatura. Al intentar disolver el chocolate en leche fría, podremos notar que el proceso es mucho más lento, mientras que al calentar la leche la barra de chocolate se disuelve mucho más fácil. Esto se debe a que al aumentar la temperatura se contribuye al rompimiento de los enlaces y deja a los iones susceptibles de reaccionar con el medio, en este caso, un medio acuoso. Sin embargo, este requerimiento energético, también involucra un aumento de costos a nivel industrial que debe considerarse en la rentabilidad del proyecto de explotación minera. Finalmente, la separación del carbonato de litio del licor de lixiviación se realizó mediante carbonatación y cristalización durante la evaporación del agua, logrando una recuperación cercana al 90%, un proceso que simula lo que sucede de manera natural con las salmueras. Este estudio destacó la eficacia del ácido fluorhídrico en la extracción de litio y la importancia de optimizar las condiciones operativas para obtener un producto final de alta pureza.

En conjunto, estos estudios destacan la complejidad de los procesos térmicos y químicos involucrados en la extracción de litio. Desde la conversión térmica de espodumena en  $\beta$ -espodumena hasta el uso de ácidos específicos para maximizar la recuperación de litio, cada etapa del proceso tiene un impacto significativo en la eficiencia y efectividad de la extracción. La identificación de fases intermedias como  $\gamma$ -espodumena y el desarrollo de nuevas técnicas como el uso de microondas para la conversión de fase reflejan el continuo avance en la tecnología de procesamiento de minerales. A medida que la demanda de litio sigue creciendo, estas investigaciones proporcionan valiosas directrices para mejorar los métodos de extracción y asegurar un suministro sostenible de este recurso esencial para las tecnologías del futuro.

La extracción de litio ha adquirido una importancia estratégica en la era moderna debido a su papel crucial en el desarrollo de tecnologías avanzadas como baterías de iones de litio y dispositivos electrónicos, lo que plantea un puente hacia energías limpias, cuya eficiencia depende de la capacidad de contener y distribuir dicha energía. En los últimos cinco años, numerosos estudios han centrado sus esfuerzos en mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos de extracción de litio, especialmente a partir de minerales clave como la espodumena y la lepidolita, pero bajo la meta de alejarse de los sistemas de disolución altamente corrosivos, como única opción para su procesamiento. Este texto revisa los avances recientes en el campo, destacando métodos innovadores de calcinación, lixiviación y otras técnicas emergentes que han contribuido a optimizar la extracción de este metal valioso.

En 2019, Abdullah et al. realizaron un estudio crucial sobre la transformación de la espodumena de alta calidad, específicamente la fase alfa. El objetivo de su investigación era refinar el mineral para aumentar su reactividad química. Para ello, llevaron a cabo una calcinación a 842°C y analizaron los polvos resultantes mediante técnicas avanzadas como la difracción de rayos X (DRX), radiación de tubo catódico y sincrotrón. Los resultados mostraron que, al alcanzar los 1025°C, la espodumena amorfa se transforma en una especie de  $\gamma$ -espodumena, la cual recrystaliza para formar  $\beta$ -espodumena a 975°C. La  $\beta$ -espodumena es conocida por su mayor reactividad, lo que la convierte en una fase ideal para la extracción de litio. Estos avances implican que los cambios estructurales a los que es sometida la espodumena en el proceso de calcinación son mucho más complejos, sin embargo, el desarrollo y aplicación de técnicas de caracterización mucho más avanzadas, nos permiten subrayar la importancia de controlar la velocidad de calentamiento y la molienda a tamaños de partícula finos, lo cual resulta fundamental para mejorar la eficiencia del proceso de extracción.

En 2020, Guo et al. propusieron una técnica innovadora utilizando una mezcla de ácido sulfúrico y ácido fluorosilícico como medio lixivante para la lepidolita y otros minerales de litio. Su investigación implicó el monitoreo de diversos parámetros, como la relación sólido-líquido, la concentración del agente complejante, la temperatura (40-80°C) y el tiempo de reacción (15-75 minutos). Los resultados obtenidos mostraron una recuperación significativa del 97.9% de litio, 96.4% de potasio, 97.6% de rubidio, 96.7% de cesio y 81.4% de aluminio. Aunque este método demostró un alto poder de disolución, presentó una baja selectividad hacia el litio, y se observó la formación de HF como subproducto, el cual es el verdadero agente lixivante en el proceso. La selectividad química se refiere a la capacidad de una reacción química, un catalizador o un método analítico para discriminar entre diferentes reactivos o componentes en una mezcla y dirigir su actividad hacia un objetivo específico. En este caso, lo ideal sería que el sistema seleccionado logrará extraer únicamente al litio, separándolo del resto de los componentes presentes en los silicatos. Aunque este sistema no logra dicha selectividad, delata la presencia de subproductos, es decir, elementos que aunque no son el objetivo de la extracción, también son de interés económico y pueden llegar a ofrecer un valor agregado a la explotación de litio, ese es el caso del cesio y el rubidio.

Chen et al., en 2021, introdujeron un método de lixiviación verde para extraer litio y cobalto residual a partir de baterías usadas utilizando glicina como agente lixivante. Este método resulta ser el primer cambio de importancia ambiental para la extracción de litio, ya que además de considerar una fuente secundaria como origen extractivo del litio. Una fuente extractiva secundaria, son aquellos materiales que ya han sufrido algún cambio a razón de la

actividad antropogénica y resultan de procesos industriales como subproductos o residuos, en este caso, baterías de litio usadas. Otra propuesta interesante es el uso de la glicina como agente lixivante, es decir, aquel ion que mantiene el litio en el medio acuoso. La glicina es un aminoácido simple que forma parte de los componentes de las proteínas en los organismos vivos, por lo que puede llegar a reincorporarse en el medio ambiente. El proceso se realizó con una solución de 300 g L<sup>-1</sup> de glicina, 10% de peróxido de hidrógeno, una relación sólida/líquido de 1:100, a 353 K y durante 7 horas. Con este método, se alcanzaron recuperaciones del 97.07% para cobalto y del 90.95% para litio. Chen et al. explicaron que el control de la disolución se atribuye a las reacciones químicas interfaciales, dicho de otra manera, a la interacción química que hay entre los sólidos y el líquido del medio. Este enfoque representa una alternativa más ecológica y eficiente para el reciclaje de baterías usadas, añadiendo valor al proceso de extracción.

Ese mismo año, Kuai et al. investigaron la calcinación de lepidolita a 850°C en presencia de carbonato de potasio, lo que permitió eliminar el 80% del flúor presente en el mineral y obtener una extracción del 95.52% de litio y del 95.7% de potasio. Durante la calcinación, se formaron dos productos importantes: un silicato de aluminio y potasio soluble en condiciones ácidas y un silicato de litio y potasio soluble en agua. Por esta razón, parte de los silicatos se pueden retirar con agua, pero aún se requiere de un medio ácido para alcanzar altas recuperaciones de litio, lo que demuestra la complejidad del proceso y la necesidad de optimización adicional. Sin embargo, este estudio es pionero en la disolución de la lepidolita, un mineral con sus propias complicaciones como necesidad de una molienda sumamente fina debido a su estructura reticular y la presencia de flúor en su estructura, elemento que, al ser liberado en la calcinación, puede ser de importancia ambiental. Por otra parte, este filosilicato también ofrece el área de oportunidad de aprovechar la presencia de cesio y rubidio como subproductos. Posteriormente, estas condiciones operativas fueron corroboradas por Liu et al., en 2022 y Zhang et al., en 2022, destacando al ácido sulfúrico como medio de disolución de las micas de litio y la importancia de un pretratamiento térmico para eliminar elementos volátiles y simplificar la estructura del mineral.

Finalmente, Gao et al., en 2023, realizaron una revisión exhaustiva de los métodos de extracción de litio de minerales pegmatíticos, comparándolos con las salmueras. Su análisis incluyó métodos ácidos y alcalinos, tostación salina y cloración, evaluando la demanda de recursos, los costos de producción y el impacto ambiental. Los métodos alcalinos y de cloración, aunque menos eficientes en cuanto a extracción, presentan un menor requerimiento energético. Los métodos ácidos, aunque más eficientes en la extracción, enfrentan desafíos como el manejo complejo en planta y el alto consumo energético. La tostación salina y la calcinación requieren ajustes en la proporción de sulfato y deben abordar problemas de residuos gaseosos y costos elevados, especialmente para minerales pegmatíticos en comparación con salmueras (Garcés- Millán, 2000).

# III Método experimental

## 3.1 Plan metodológico

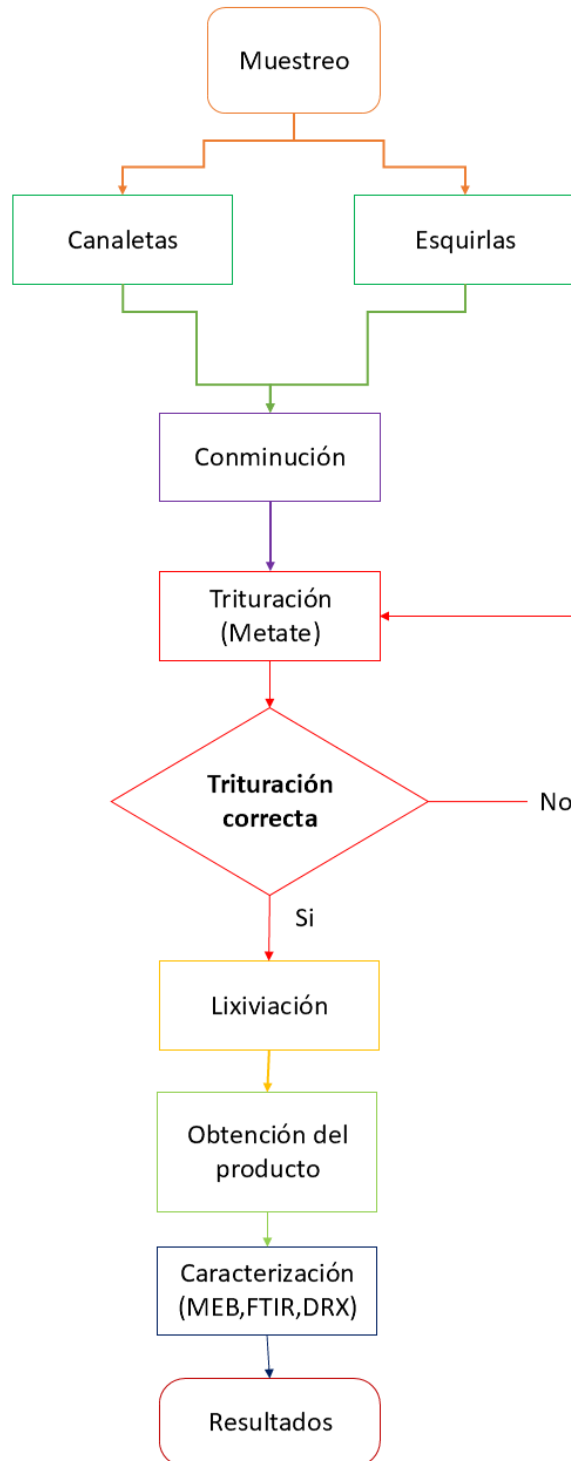


Figura 16 Plan metodológico

### 3.2 Localización

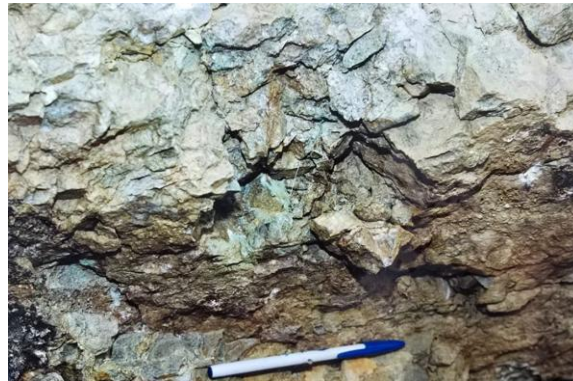
Las coordenadas de GPS son 20° 42' y 20° 59' Norte, 98° 41' y 98° 53' Oeste y a una elevación de 2200 metros sobre nivel del mar, en el municipio de Molango, como se muestra en la imagen 17



*Figura 17 Municipio de Molango, Hidalgo*

### 3.3 Muestreo

El muestreo de la muestra mineralógica, mostrado en la figura 18, fue llevado en forma de esquirlas tomando 10 kilos de material por triplicado



*Figura 18 Deposito Red Bed*

### 3.4 Preparación mecánica

La roca se llevó a un proceso de molienda en el metate, el cual consiste en una placa de hierro con un apisonador donde la fricción va reduciendo el tamaño de partícula hasta volverlo un polvo fino. Una vez ya reducido el tamaño de partícula se hizo la selección de la muestra a través de la técnica de cuarteo, la muestra se secciono para llevarla a estudios como infrarrojo, MEB, análisis granulométrico y difracción de rayos X.



**Figura 19 Metate de Acero**

**Análisis granulométrico**, es el conjunto de operaciones cuyo fin es determinar la distribución del tamaño de los elementos que componen una muestra. permite estudiar y conocer el tamaño de las partículas y sedimentos presentes en una muestra, y medir la importancia que tendrán según la fracción de suelo que representen, se realiza por tamizado, o por sedimentación cuando el tamaño de las partículas es muy pequeño. Para separar el material se utiliza una serie de tamices en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. (C.O.C COTECNO,2017). Una vez obtenido el mineral con el que se trabajaría se llevó a cabo el método de cuarteo donde el material grueso rueda sobre la superficie hacia abajo, mientras que los más finos quedan en el vértice en la superficie del cono, así se produce un cierto desmezcle pero con una distribución simétrica que no afecta al cuarteo, para lo cual se distribuye el material del vértice regularmente hacia todos los lados, los cuadrantes tienen las mismas dimensiones y con mucho cuidado se separa el mineral de dos cuadrantes opuestos, arrastrando el polvo con una escoba o brocha, el mineral de los otros dos cuadrantes se vuelve a mezclar varias veces (figura 3.6) hasta obtener la cantidad de muestra representativa necesaria.

Una vez pasada por un análisis granulométrico el cual se llevó a cabo con un Ro-Tap (W.S Tyler tipe IIOV-60Hz) se tamizo la muestra a través de un tamiz (W.S Tyler 11256980 # 200), que tiene 200 aberturas en una pulgada (25,4 mm)



**Figura 20 Tamiz No. 200 Marca W.S TYLER**



**Figura 21 Ro-Tap W.S Tyler tipe IIOV-60Hz**

**La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**, La espectroscopia IR es el método por el cual se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio. Se basa en que las moléculas tienen la posibilidad de rotar y vibrar a distintas frecuencias (modos normales vibracionales). O sea que, una molécula puede absorber la energía de fotones en el rango energético de IR (2. D. R. C. Catalina Gomez Hoyos, 2008).

Las muestras se llevaron a la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier la cual consiste en técnica instrumental que permite identificar y caracterizar sustancias químicas a partir de cómo interactúan con la radiación infrarroja. En función de la frecuencia, lo que revela los modos de vibración de los enlaces químicos de una molécula, cada enlace químico vibra a una frecuencia característica, por lo que el espectro infrarrojo actúa como una “huella digital molecular”.

Las muestras se prepararon disminuyendo el tamaño de partícula, se secaron para eliminar la humedad para no interferir con el resultado de la espectroscopia, se colocó la muestra en polvo en el cristal de bromuro de potasio, se sujetó con el brazo de sujeción y se realizó la espectroscopia en un Espectrómetro perkin elmer mod gx59750

### 3.5 Difracción de Rayos X (DRX)

es una técnica analítica utilizada para determinar la estructura cristalina de los materiales. La difracción de rayos X proporciona información sobre la disposición atómica y la estructura de los cristales, y es fundamental en la ciencia de materiales, química y física (Cullity et al., 2001).

A la par se realizó una difracción de rayos X que es una técnica analítica utilizada para determinar la estructura cristalina de los materiales. La difracción de rayos X proporciona información sobre la disposición atómica y la estructura de los cristales, y es fundamental en la ciencia de materiales, química y física para determinar el arreglo en los cristales, así como para determinar los compuestos que se presentan en el mineral. El equipo donde se realizó fue el difractómetro de rayos X marca Inel Modelo Equinox 2000 con un tubo de rayos X de cobalto k Alpha 1 con una resolución de 0.065 FWH



Figura 22 DRX Inel Modelo Equinox 2000

### 3.6 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Permite la observación de la morfología superficial de las muestras con alta resolución. Es útil para estudiar la topografía, la composición elemental y la estructura de superficies (Goldstein et al., 2017)

Una vez obtenido el mineral se utilizó un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca Jeol modelo JSM-IT3000 (figura 3.9) con un alcance de 500,000 magnificaciones, un tamaño in situ (spot size) de 10-2 a 10-5 ampliificaciones con una aceleración de voltaje de 30Kv, equipado con un detector de energía retrodispersiva de rayos X (EDS) marca Oxford. Para realizar el microanálisis semicuantitativo elemental en las muestras de análisis hasta regiones menores a 0.5 micrómetros.



Figura 23 MEB Jeol modelo JSM-IT3000

### 3.7 EQUIPO Y MATERIAL PARA LIXIVIACIÓN

Una vez obtenida la muestra a una malla 200 se realizaron lixiviaciones acidas utilizando un reactor, una propela durante 3 horas y dejando reposar el mineral durante un tiempo de 3 semanas.



Figura 24 Filtrado de la lixiviación

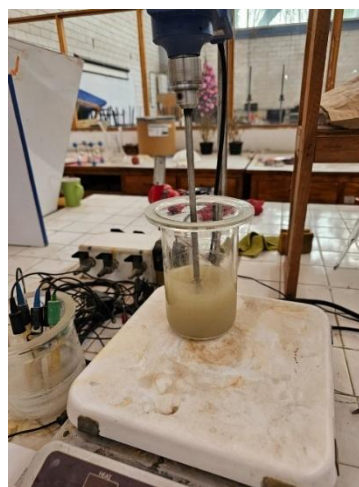


Figura 25 lixiviación llevada por agitación con propela

Una vez reposado se filtró el contenido y se obtuvo el mineral ya lixiviado esto se llevó a cabo utilizando el siguiente material el cual se describe en las tablas, 1, 2 y 3

**Tabla 1 Material de laboratorio para lixiviación**

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
Vaso de precipitado	1	Graduado
Reactor	1	Cristal
Vidrio de reloj	1	Cristal
Embudos	3	Cristal
Agitador / propela	1	n/a
Piseta	1	Agua desionizada

**Tabla 2 Reactivos químicos para lixiviación**

<b>Reactivo</b>	<b>Formula</b>	<b>Pureza</b>	<b>Marca</b>
Ácido Sulfúrico	$H_2SO_4$	70.77	Distribuidora química Alvi

**Tabla 3 Condiciones del Experimento para lixiviación**

<b>Experimentación</b>	<b>Condiciones experimentales</b>
Tamaño de partícula (mallas)	200
Cantidad de mineral (gr.)	50
Cantidad de ácido sulfúrico (ml)	40
pH	10-11
Temperatura	25
Tiempo (min.)	180
RPM	750

### 3.8 EQUIPO Y MATERIAL PARA LA PRECIPITACION DE Au y $Li_2CO_3$

El sobrante solido de la anterior lixiviación se ocupa para realizar la precipitación de Au y  $Li_2CO_3$  poniéndolo en un reactor con una agitación de 450 RPM agregándole 30 gramos de tiosulfato de sodio y 1 gramo de ditionitio de sodio todo esto con la finalidad de mantener un Ph de 6 para obtener la primera precipitación.



Figura 26 Precipitación de AU y  $Li_2CO_3$

Material utilizando para la recuperación de litio, el cual se describe en las tablas 4, 5 y 6

Tabla 4 Material de laboratorio para Precipitación de AU y  $Li_2CO_3$

Material	Cantidad	Descripción
Vaso de precipitado	1	Graduado
Reactor	1	Cristal
Vidrio de reloj	1	Cristal
Embudos	3	Cristal
Agitador / propela	1	n/a
Potenciómetro	1	N/a
Piseta	1	Agua

**Tabla 5 Reactivos químicos para Precipitación de AU y  $Li_2CO_3$**

Reactivo	Formula	Pureza	Marca
Tiosulfato de sodio	$Na_2S_2O_3$	99.5	J.T. BAKER
Hidróxido de Sodio	NaOH	98.8	J.T. BAKER
Ácido Sulfúrico	$H_2SO_4$	<b>70.77</b>	Distribuidora química Alvi
Ditionitio de sodio	$Na_2S_2O_4$	<b>99.5</b>	J.T. BAKER

**Tabla 6 Condiciones del Experimento para Precipitación de AU y  $Li_2CO_3$**

Experimentación	Condiciones experimentales
Tamaño de partícula (mallas)	200
Cantidad de Tiosulfato de sodio (gr.)	30
Cantidad de Ditionitio de sodio (gr)	1
Cantidad de mineral (gr.)	50
pH	6 y 8
Temperatura	25
Tiempo (min.)	180
RPM	450

### Precipitación de $Li_2CO_3$ inducida por luz UV

El proceso de precipitación de carbonato de litio ( $Li_2CO_3$ ) a partir del lixiviado de red bed se llevó a cabo con una lamapara de luz UV (Gnerick AMZ7565) de 395 Nm potencia para ello se recreó un cuarto oscuro, para que solo recibiera la luz UV y se dejaron 3 muestras a diferentes tiempos de 1, 2 y 3 horas.



**Figura 27 Cuarto oscuro**



**Figura 28 Lamapara luz UV**

## IV Resultados

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

Los resultados se presentan de acuerdo al plan experimental; en primer lugar, la caracterización exhaustiva del mineral redbed por diferentes métodos, posteriormente se aborda la molienda y por último se presentan los resultados y discusiones obtenidos de la lixiviación con tiosulfatos.

#### Análisis Granulométrico

Los resultados de granulometría del mineral tipo redbed presentan tamaños de partícula relativamente grandes con una distribución granulométrica estándar de malla 80 ( $177 \mu\text{m}$ ) y un tamaño medio malla 200 ( $74 \mu\text{m}$ ) donde se encuentra la mayor concentración, tal como se observa en la figura 29 donde se presenta la distribución granulométrica en % retenido, % Acumulado.

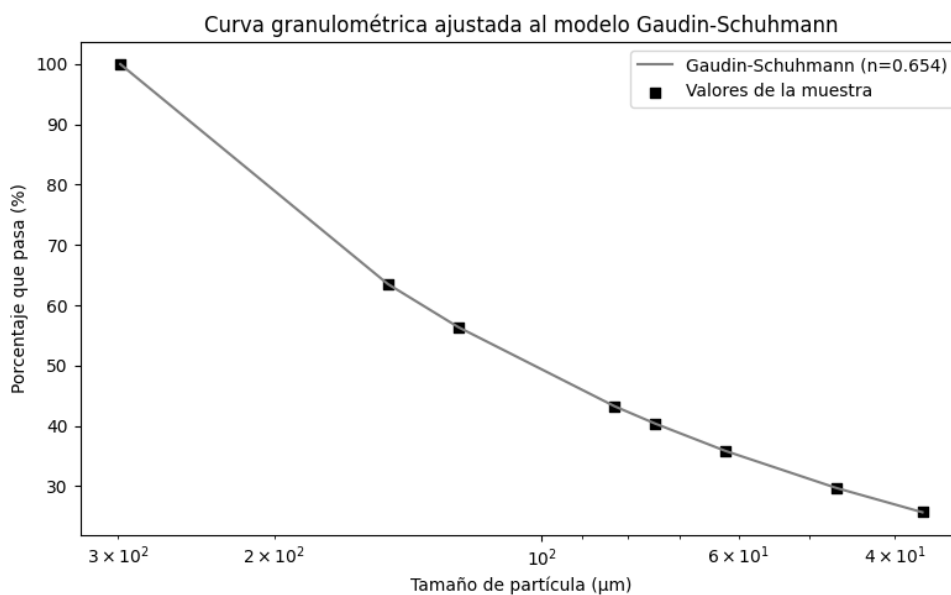


Figura 29 Curva granulométrica Gaudin-schumann

## Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Microanálisis por Dispersión de Energías (EDS)

Mediante el uso de electrones secundarios se obtuvieron las imágenes de la figura 30, donde se observan una morfología semicoidal a irregular con un tamaño relativo de partículas entre  $\sim 1$  y  $6 \mu\text{m}$  de diámetro mayor, observadas a **5,000× de aumento**.

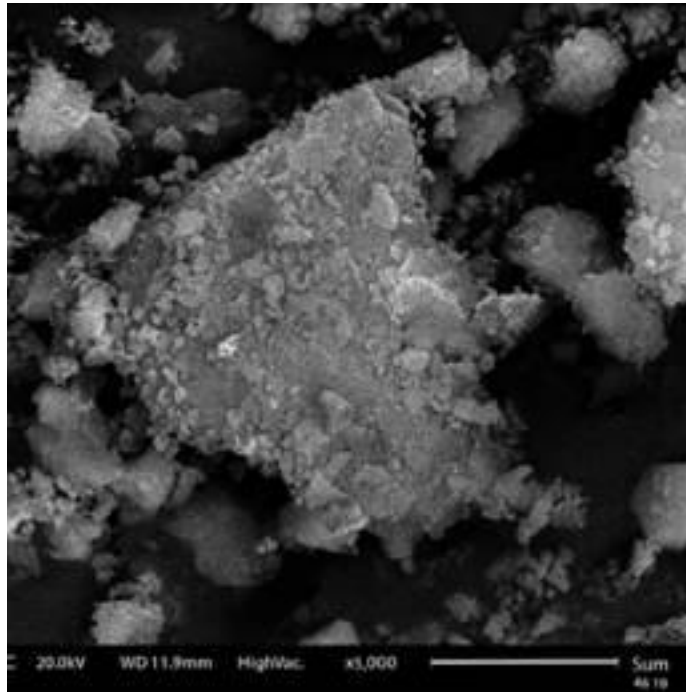


Figura 30 Imagen MEB mineral redbed

Así mismo se observa el espectro de la figura 31 realizado por microanálisis de energía dispersiva EDS, se puede apreciar la presencia de elementos mayoritarios de carbón, silicio, azufre, así como elementos minoritarios plata, sodio, aluminio y cobre y como elementos traza oro como se aprecia en la tabla 7. que son característicos de este tipo de yacimientos confirmando con esta técnica los resultados obtenidos por fluorescencia y difracción de rayos X.

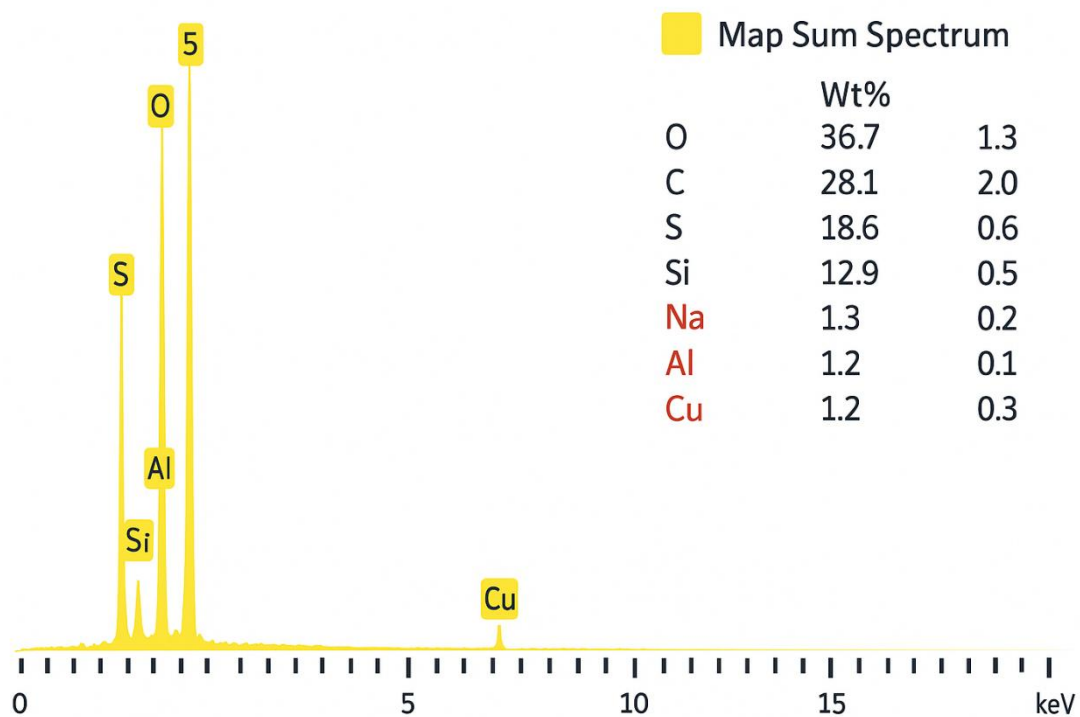


Figura 31 EDS mineral redbed

Tabla 7 Elementos y porcentaje en peso del mineral redbed

Elemento	Símbolo	Porcentaje en peso (Wt%)
Oxígeno	O	36.7 %
Carbono	C	28.1 %
Azufre	S	18.6 %
Silicio	Si	12.9 %
Sodio	Na	1.3 %
Aluminio	Al	1.2 %
<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	<b>1.2 %</b>

Por otra parte, en la figura 32 se presenta el mapeo del mineral mostrando la distribución de los elementos encontrados. En la siguiente figura se puede apreciar la distribución de los elementos químicos de manera particular y como se encuentran y denotan su presencia con diferentes colores como se aprecia. En donde apreciamos la singular presencia de oro (Au), el cual es un elemento importante para el desarrollo de esta investigación.

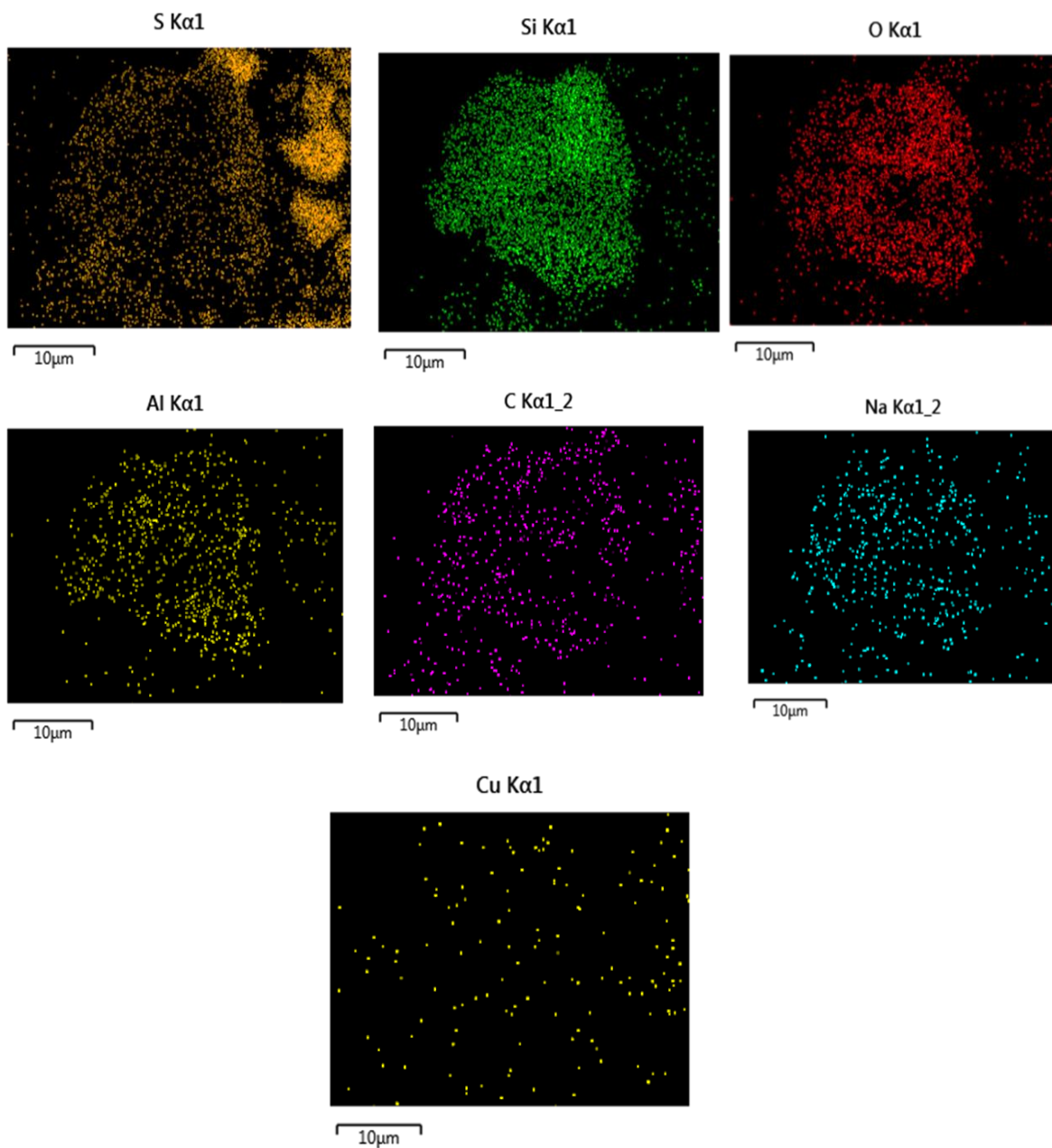


Figura 32 mapeo de los elementos del mineral red bed

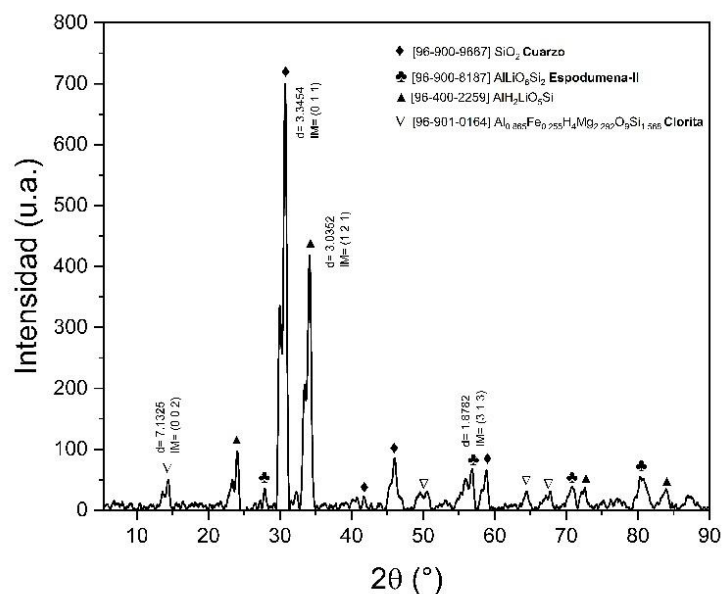
**Tabla 8 Fases mineralógicas encontradas en la REDBED**

Fase mineralógica	Fórmula química	PDF
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	96-900-9687
Espodumena-II	AlLiSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	96-900-8187
<b>Petalita</b> ( <i>o posible fase de litio-aluminio-silicato</i> )	AlH <sub>2</sub> LiO <sub>5</sub> Si	96-400-2259
Clorita	Al <sub>0.265</sub> Fe <sub>0.255</sub> H <sub>4</sub> Mg <sub>9.290</sub> O <sub>18</sub> Si <sub>11.565</sub>	96-901-0164

### Análisis por Difracción de Rayos X

El método de Difracción de Rayos X proporciona un medio adecuado y práctico para la identificación cualitativa de compuestos cristalinos complejos, como es el caso de este material, constituido principalmente por minerales no metálicos, acompañados en baja porción por minerales metálicos en forma de óxidos y sulfuros, encontrando los valores de oro principalmente contenidos en los sulfuros minerales (figura 33).

La tabla 8 muestra la identificación por DRX, en orden de abundancia de las especies minerales identificadas, cristalinidad y tamaño de cristal.



**Figura 33 DRX del mineral red bed**

### Espectrometría de Plasma Acoplado Inductivamente

Se analizaron seis muestras representativas de roca de Molango mediante ICP-MS, seguido de disolución química selectiva para evaluar el comportamiento de los elementos metálicos.

Las concentraciones promedio fueron: Au (93 ppb), Ag (1,7 g/t), Cu (2000 ppm), Pb (1,06 ppm), Zn (0,384 ppm), Ti (6,02 ppm), Mo (0,044 ppm), Mn (2,37 ppm), Cr (0,058 ppm), Ni (0,005 ppm), V (0,317 ppm), Ba (2,16 ppm), Fe (77,6 ppm), Ca (168 ppm) y K (25,8 ppm).

Por otra parte, Una muestra de la zona mineralizada presentó valores significativamente más altos: Au (8 ppm), Ag (14,7 g/t), Cu (10 000 ppm), Pb (4 ppm), Zn (90 ppm) y Co (16 ppm). En contraste, las muestras de las áreas circundantes arrojaron concentraciones más bajas: Au (5 ppb), Ag (0,4 g/t), Cu (3000 ppm), Pb (2 ppm), Zn (86 ppm) y Co (13 ppm).

### Análisis por espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

En la figura 34 se muestra el espectro FTIR de una muestra representativa del depósito de Red Bed de Molango. Se identificaron cinco bandas de absorción prominentes, que corresponden a modos vibracionales típicos de silicatos hidratados y aluminosilicatos de litio.

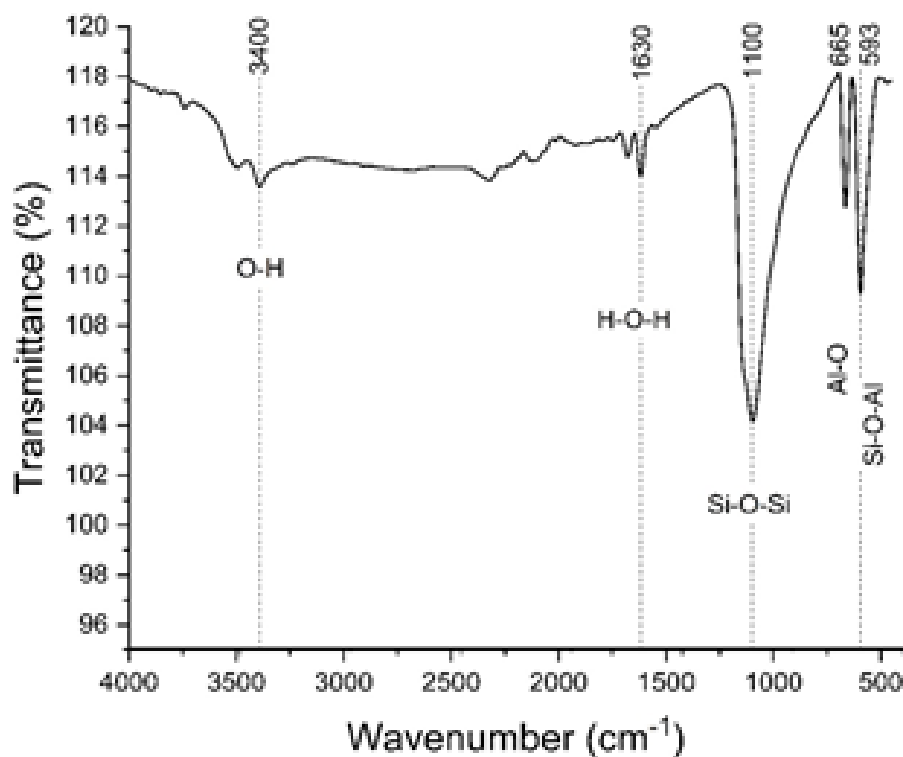


Figura 34 Espectro FTIR del depósito de lecho rojo de Molango con bandas típicas de silicatos y fases hidratadas.

El espectro FTIR de la Figura x muestra cinco bandas de absorción características. La banda ancha a  $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$  y la banda a  $\sim 1630\text{ cm}^{-1}$  corresponden a la vibración de tensión O–H y a la vibración de flexión H–O–H del agua adsorbida, relacionadas con la humedad superficial y los grupos silanol. La banda dominante cerca de  $\sim 1100\text{ cm}^{-1}$  representa la vibración de tensión asimétrica de los enlaces Si–O–Si, típica de estructuras de silicato como el espodumeno y el cuarzo. Las bandas a  $665$  y  $593\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a vibraciones de Al–O y Si–O–Al, respectivamente, lo que indica espodumeno y posibles filosilicatos secundarios, por ejemplo, clorita, en consonancia con los resultados de XRD

### Análisis por Espectroscopia Foto electrónica de Rayos-X

Para confirmar la presencia de litio en la muestra de lecho rojo de Molango, se realizó espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS). El espectro de energía de enlace Li 1s se muestra en la Figura 35.

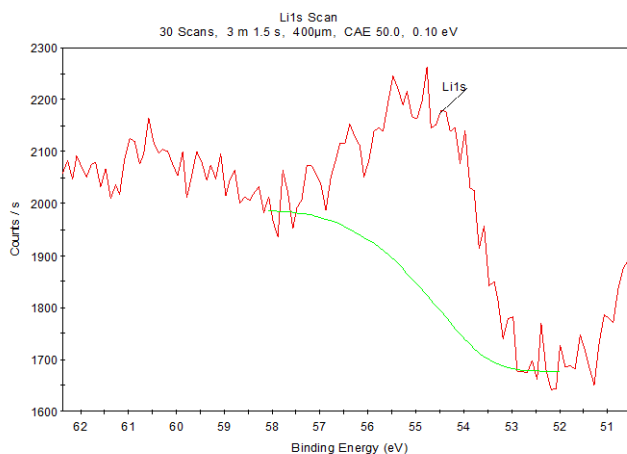


Figura 35 Espectro XPS Li 1s del depósito de lecho rojo de Molango.

La señal a  $54,83\text{ eV}$  confirma la presencia de litio en estado oxidado, incorporado a fases no metálicas como el espodumeno ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ), la zabuyelita ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) o arcillas esmectíticas que contienen litio. Esta energía de enlace coincide con informes recientes que documentan señales de Li 1s entre  $54,83$  y  $55,93\text{ eV}$ , atribuidas a compuestos de LiF y  $\text{Li}_x\text{SO}_y\text{F}_z$  en las capas SEI de ánodos de silicio tratados con LiFSI. Revisiones recientes sobre la recuperación de litio a partir de arcillas sedimentarias también señalan la detección frecuente de  $\text{Li}_2\text{O}$  y  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  mediante XPS en contextos geológicos similares, incluidos los depósitos de lechos rojos.

En combinación con los resultados de XRD e ICP, estos datos confirman la presencia de litio en fases minerales reactivas dentro del depósito, lo que respalda su potencial extractivo e industrial.

## Análisis de Fluorescencia de Rayos X

En la tabla 9 se muestra el espectro de FXR de una muestra representativa del depósito de Red Bed de Molango. En la tabla podemos observar compuestos tales como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

**Tabla 9 Componentes de red bed de XRF**

Componente	Contenido (%)
<b>MgO</b>	< LOD
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.94
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0.59
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.56
<b>S</b>	0.10
<b>Cl</b>	0.06
<b>K<sub>2</sub>O</b>	< LOD
<b>CaO</b>	0.04
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.03
<b>V, Cr, MnO, Ni, Cu, Zn, etc.</b>	Todos < 0.1
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>48.55 ± 0.36</b>
<b>MnO</b>	9.71 ± 0.18
<b>Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, etc.</b>	Todos < 0.05
<b>Elementos pesados (Pb, Bi, Th, U, etc.)</b>	Todos < LOD

La muestra presenta Dominancia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\approx 48.5\%$ ) y  $\text{MnO}$  ( $\approx 9.7\%$ ), con escasos silicatos o aluminosilicatos. El bajo  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sugiere que no es una roca silicatada común, sino una muestra metálica o mineral oxidado, probablemente un óxido de hierro-manganeso, la presencia menor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  y S puede deberse a impurezas o fases accesorias

## 4.2 RESULTADOS POR LIXIVIACIÓN

Para el estudio de la recuperación del oro se una serie de experimentos estudiando el efecto de la concentración de tiosulfatos sobre la velocidad de lixiviación del oro contenido en material, para lo cual se utilizó un reactor de un litro utilizando las siguientes variables: concentración de Tiosulfatos [ $\text{S}_2\text{O}_3$ ] ( $\text{gL}^{-1}$ ) = 15.8, Parámetros constantes: Temperatura = 298

°K, mineral = 40 g L<sup>-1</sup>, pH = 9, volumen de solución = 500 mL, velocidad de agitación 500 min.<sup>-1</sup>, presión parcial de O<sub>2</sub> = 1 atm.

Durante todo el proceso experimental el pH se mantuvo constante adicionando al reactor solución de NaOH 0.2 M previamente preparada. El avance de la reacción se evaluó igualmente por análisis cuantitativo de Ag a los diferentes tiempos de reacción, previamente establecidos.

Los resultados obtenidos para las diferentes concentraciones de tiosulfatos experimentadas se muestran en las tablas 10

Poner la composición del oro obtenido tanto en solución como el recuperado

### Caracterización por MEB\_EDS

En las imágenes obtenidas por SEM no se presentó un gran cambio en su morfología sin embargo hubo un cambio significativo en el tamaño y forma de las partículas. Las partículas presentan una forma Isométrica a sub-angulosa, lo cual sugiere precipitación controlada, y un tamaño estimado de entre 1 y 4 μm, con algunas más grandes (~5–6 μm) y otras más finas en el fondo como se puede apreciar en la figura 36.

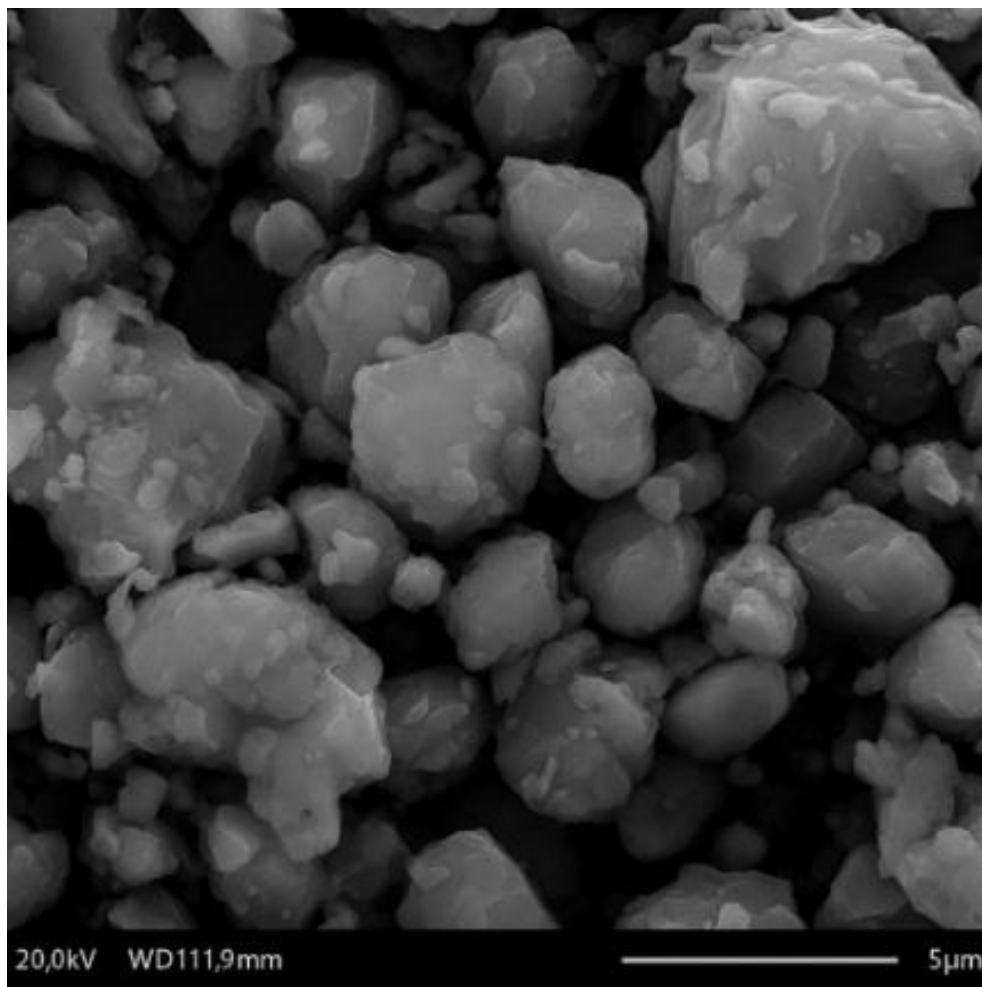


Figura 36 Morfología del mineral tipo redbed después de lixiviarlo

En la figura 37 se muestra El espectro de la muestra lixiviada, donde se puede observar cómo fases mayoritarias el sodio, carbono azufre y minoritarias el oro y la presencia del uranio, los cuales se puede ver su distribución en la figura 38 del mapping de la misma.

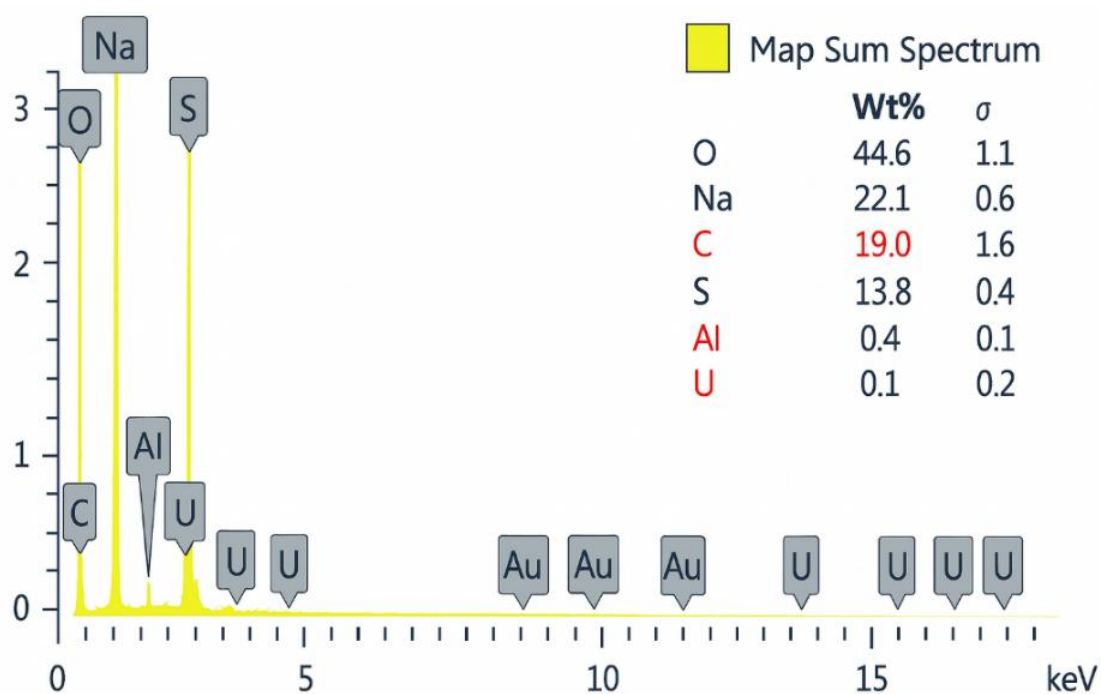
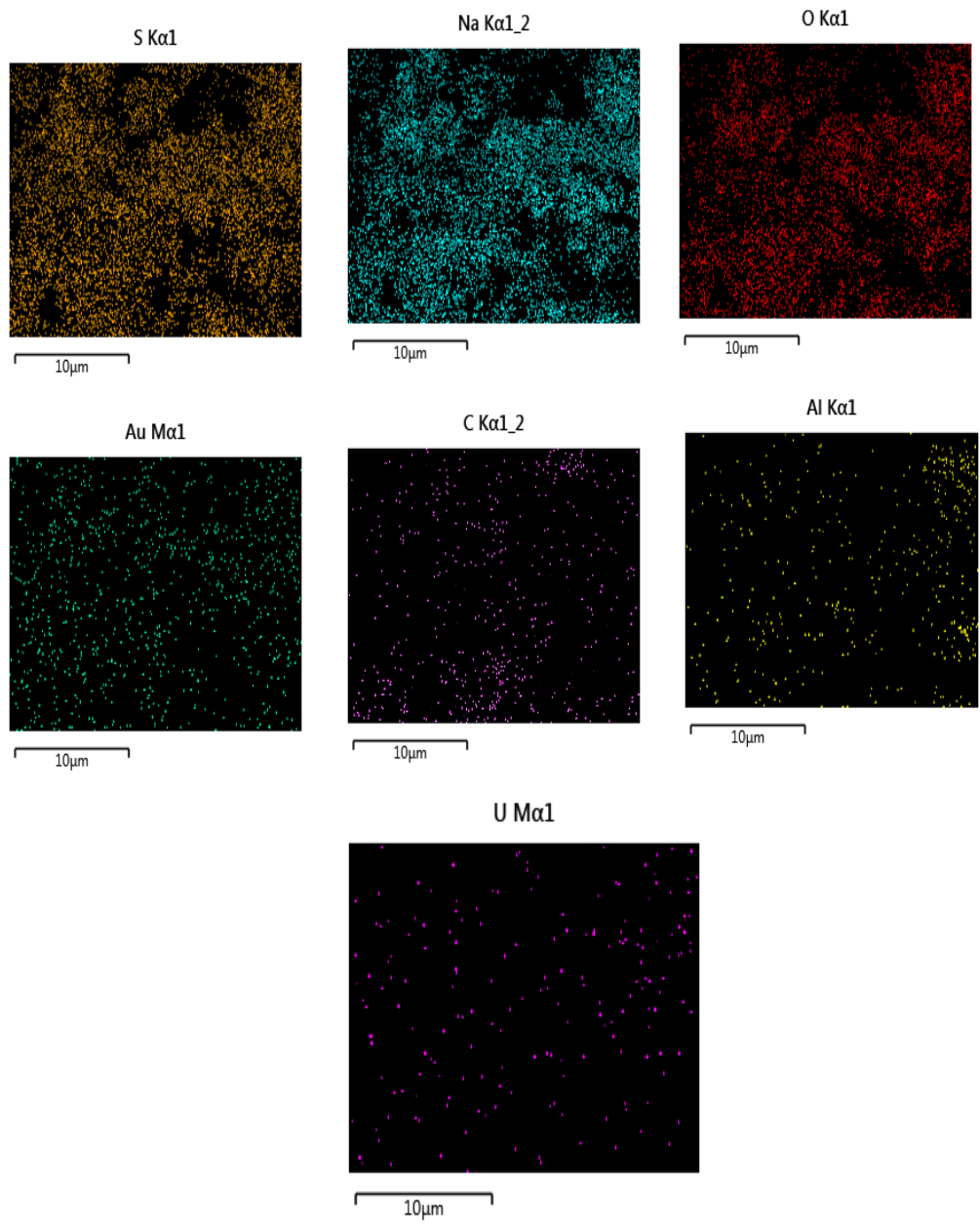


Figura 37 EDS muestra lixiviada

**Tabla 10 Elementos y porcentaje en peso de la muestra lixiviada**

Elemento	Símbolo	% en peso (Wt%)
Oxígeno)	O	44.6%
Na (Sodio)	Na	22.1%
C (Carbono)	C	19.0%
S (Azufre)	S	13.8%
Al (Aluminio)	Al	0.4%
U (Uranio)	U	0.1%



**Figura 38 Mapeo de los elementos de la muestra lixiviada**

## Caracterización por difracción de rayos X del material lixiviado

En la figura 39 se observa el difractograma donde revela que la muestra contiene una arcilla tipo hectorita como fase principal (tabla 10). Se acompaña de carbonatos (calcita) y una posible fase de carbonato de litio (Zabuyelita). La mineralogía sugiere un entorno evaporítico o alterado hidrotermalmente, con presencia de litio y sodio, compatible con formaciones tipo salar o margas líticas, principalmente margas líticas.

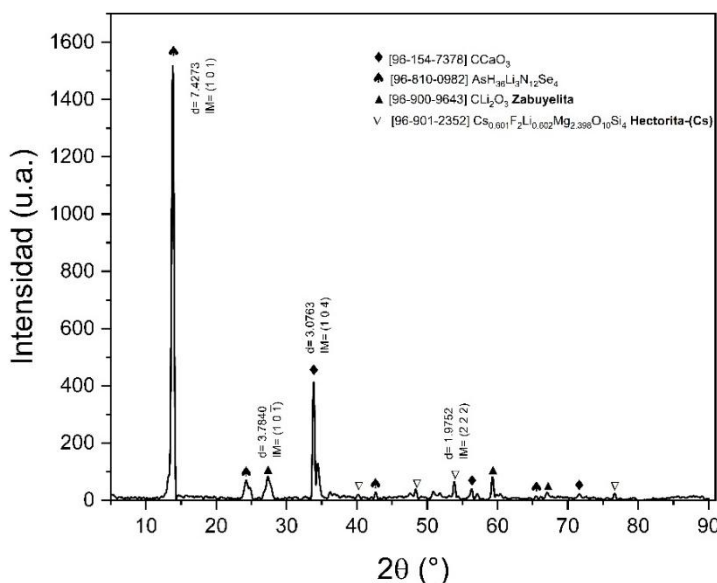


Figura 39 DRX de la muestra lixiviada

Tabla 11 Fases mineralógicas del material lixiviado

Fase mineralógica	Fórmula química	PDF
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	96-154-7378
Compuesto de arseniuro de litio y selenio	AsH <sub>34</sub> Li <sub>3</sub> N <sub>12</sub> Se <sub>4</sub>	96-610-0982
Zabuyelita	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	96-900-9643
Hectorita-(Cs)	Cs <sub>0.601</sub> F <sub>0.602</sub> Li <sub>0.602</sub> Mg <sub>2.398</sub> O <sub>10</sub> Si <sub>4</sub>	96-901-2352

## Análisis de Fluorescencia de Rayos X

En la tabla 12 se muestra el espectro de FXR de una muestra representativa del depósito de Red Bed de Molango. La muestra presenta compuestos de MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

**Tabla 12 Componentes del mineral lixiviado de XRF**

Componente	Contenido (%)
MgO	< LOD
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.14
SiO <sub>2</sub>	0.91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	41.60
S	0.98
Cl	0.17
CaO	1.46
TiO <sub>2</sub>	0.04
MnO	<b>15.01</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>13.11</b>
Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, etc.	< 0.05
Pb, Bi, Th, U, etc.	< LOD

La muestra pertenece claramente a una serie Fe–Mn, probablemente minerales de óxidos de hierro y manganeso con fases accesorias.

### **Precipitación de litio inducida por luz UV**

Como se muestra en la tabla 13 se utilizaron 3 muestras de 10 mililitros de solución lixiviada las cuales se les incidió luz Ultravioleta durante 1, 2 y 3 horas

**Tabla 13 Gramaje obtenido por incidencia de luz UV**

Muestra	Tiempo	Gr precipitados
1	1 hora	1 gr
2	2 horas	1.5 gr
2	3 horas	2.43 gr

Observamos que, a mayor tiempo de exposición a la luz ultravioleta, mayor es la cantidad de precipitado formado.

Esto sugiere que la radiación UV favorece o acelera la formación del precipitado, probablemente porque incrementa la energía disponible para las reacciones químicas involucradas en el proceso de precipitación.

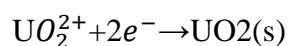


**Figura 40 Carbonato de litio precipitado**

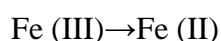
## Precipitación de Uranio Inducida por Ditionito de sodio

La precipitación de uranio inducida por ditionito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) se basa en la capacidad del ditionito para actuar como un agente reductor fuerte, transformando el U(VI) soluble en U(IV), forma que es prácticamente insoluble y precipita como dióxido de uranio ( $\text{UO}_2(\text{s})$ ).

El  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ , al disolverse, genera especies altamente reductoras ( $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_2^-$ ), capaces de reaccionar con metales en estado oxidado. La reacción principal es:



En minerales red-bed, abundan Fe (III) en hematita y goethita. El ditionito reduce primero al hierro:



El Fe (II) generado actúa como un co-reductor, acelerando la reducción del U(VI). El uranio reducido precipita como partículas finas de  $\text{UO}_2$  o fases complejas U(IV)–Fe(II), quedando retenido en la matriz mineral.



**Figura 41 Uranio lixiviado**

## V Conclusiones

La presente investigación permitió demostrar que la implementación de estrategias alternativas de lixiviación constituye una vía técnica y ambientalmente viable para la recuperación eficiente de oro y carbonato de litio desde matrices mineralógicas complejas. A través de la evaluación de sistemas lixiviantes no convencionales, como el tiosulfato de sodio para el oro y ácidos minerales para compuestos litíferos, se logró establecer condiciones operativas que superan las limitaciones de los métodos tradicionales, particularmente en minerales refractarios y sedimentarios.

En el caso del oro, el uso de tiosulfato mostró un desempeño favorable frente a la cianuración en presencia de fases sulfuradas, al evitar la formación de especies pasivantes y reducir la toxicidad del proceso, esto permitió alcanzar recuperaciones significativas en oro y platino, abriendo nuevas posibilidades para la extracción de oro y platino, considerados de bajo rendimiento económico bajo esquemas tradicionales.

Respecto al litio, se validó que la transformación térmica de la espodumena hacia su fase  $\beta$  incrementa notablemente su reactividad frente a lixiviantes ácidos, facilitando su conversión en carbonato de litio con alto grado de pureza. La adecuada selección de condiciones como temperatura, concentración ácida y relación sólido-líquido resultó determinante para maximizar la extracción, incluso en matrices sedimentarias tipo redbed poco estudiadas.

En conjunto, los resultados obtenidos en esta tesis contribuyen al diseño de rutas hidrometalúrgicas sostenibles, con enfoque en la transición energética y la valorización de recursos estratégicos. Asimismo, refuerzan la importancia de integrar caracterización mineralógica avanzada con modelado de procesos para optimizar la recuperación de metales valiosos, garantizando una explotación más eficiente, responsable y adaptada a los desafíos tecnológicos y ambientales contemporáneos.

## VI REFERENCIAS

**Abdullah** A. A.; Oskierski H.C., Altarawneh H.; Senanayake G.; Lumpkin G.; Dlugogorski B.Z. (2019) Phase transformation mechanism of spodumene during its calcination. *Minerals Engineering*, 140, 105883. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105883>

**Baker** S. P. (2002). The application of synchrotron radiation to materials science. *Journal of Synchrotron Radiation*, 9(5), 285-292. DOI: 10.1107/S0909049502000735

**Batterman** S. A., & Walther, C. (2022). Circular economy approaches in lithium-ion battery recycling: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106073. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106073>

**Benchmark** Mineral Intelligence. (2023). Lithium Market Report. Recuperado de <https://www.benchmarkminerals.com/>

**Bloomberg** NEF. (2023). Lithium Market Outlook 2023. Recuperado de <https://about.bnef.com/research/lithium-market-outlook/>

**Botto I.L.** (1985) Structural and spectroscopic properties of leached spodumene in the acid-roast processing. *Mater. Chem. Phys.*

**Callister W. D., & Rethwisch, D. G.** (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10<sup>th</sup> ed.). Wiley.

**Chan C. C., & Chan, H. L.** (2017). *Electric Vehicle: Theoretical Foundations and Advanced Applications*. Wiley. .... **Zhang, C., & Zhao, X.** (2020). Electric vehicle adoption and market penetration: A review of policies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109933. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109933>

**Chen M.; Wang R., Qi, Y.; Han, Y.; Wang, R.; Fu, J.; Meng, F.; Yi, X.; Huang, J.; Shu, J.** (2021) Cobalt and lithium leaching from waste lithium ion batteries by glycine. *Journal of Power Sources*, 482, 228942.

**Cullity, B. D., & Stock, S. R.** (2001). *Elements of X-ray diffraction* (3<sup>rd</sup> ed.). Addison-Wesley.

**Gao T; Fan N.; Chen W.; Tao Dai T.** (2023) Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost. *China Geology*, 6, 1, 137-153. <https://doi.org/10.31035/cg2022088>

**Garcés- Millan, I.**; (2000) La industria del Litio en Chile. *Boletín de la Universidad de Antofagasta, Depto. Ingeniería Química*

**García-González J., & Moya, J.** (2023). Sustainable management of lithium resources through circular economy principles: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136054. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.136054>].

**Gasalla E., Pérez, J., Rodríguez, M., & López, A.** (1897). Caracterización de la espodumena utilizando técnicas avanzadas: Difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja, análisis térmico diferencial y microscopía electrónica de barrido. *Revista de Mineralogía y Ciencias de Materiales*, 12(3), 145-162.

**Goldstein J. I., Newbury, D. E., Echlin, P., & Joy, D. C.** (2017). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis* (4<sup>th</sup> ed.). Springer.

**Goodenough J. B., & Kim, Y.** (2010). Challenges for rechargeable Li batteries. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2401-2405. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.015>

**Guo H., Kuang G., Li H, Pei W, Wang H** (2021) Enhanced lithium leaching from lepidolite in continuous tubular reactor using H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> as lixiviant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31, 7, 2165-2173. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65646-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65646-7)

**International Energy Agency (IEA).** (2023). *Global EV Outlook 2023*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>

**Jiang J., & Li, J.** (2019). The impact of electric vehicle adoption on power grid stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(2), 1021-1030. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2873445>.

**Kesler S. E.** (2018). *Mineral resources, economics, and the environment*. Cambridge University Press

- Kuai Y.**; Yao W.; Ma H.; Liu M.; Gao Y.; Guo R. (2021) Recovery lithium and potassium from lepidolite via potash calcination-leaching process. *Minerals Engineering*, 160, 106643. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106643>
- Liu Y.**, Ma B., Lv Y., Wang C., Chen Y. (2022) Selective recovery and efficient separation of lithium, rubidium, and cesium from lepidolite ores. *Separation and Purification Technology*, 288, 120667 <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120667>
- Liu Y.**, & Wang, X. (2021). Analysis of electric vehicle charging infrastructure and its impact on urban mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102536. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102536>
- Qu P. J.**, Zhang, T., & Liu, Z. Z. (2017). Lithium extraction from brine: A review of the process and economic considerations. *Minerals Engineering*, 100, 21-29.]. [Qu, P. J., Zhang, T., & Liu, Z. Z. (2017). Lithium extraction from brine: A review of the process and economic considerations. *Minerals Engineering*, 100, 21-29.
- Reimer L.**, & Kohl, H. (2008). Transmission electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis. Springer
- Rosales G. D.**, Ruiz M.C., Rodriguez M.H. (2014) Novel process for the extraction of lithium from  $\beta$ -spodumene by leaching with HF. *Hydrometallurgy*, 147–148, 1-6.
- Secretaría de Economía de México.** (2022). *Perfil del litio*. Secretaría de Economía. <https://www.gob.mx/se/documentos/perfil-del-litio>
- Sillitoe R. H.** (2010). Economic geology: Principles and practice. *Economic Geology*, 105(5), 927-957.
- Skoog D. A.**, West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Fundamentals of analytical chemistry* (9<sup>th</sup> ed.). Brooks/Cole.
- Smith R. W. J. M.**, Jones, C. L., & Richards, A. T. (2019). Pegmatites: A review of their formation, geochemistry, and economic importance. *Mineralogical Magazine*, 83(6), 1491-1509
- Souza S. O. D.** (2002). Efeito da radiação UV e gama nas propriedades de absorção óptica, de ressonância paramagnética eletrônica e de termoluminescência na kunzita (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). doi: 10.11606/T.43.2002.tde-04102012-152133
- Tarascon J. M.**, & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359-367. <https://doi.org/10.1038/35104644>
- Turner J. W. D.** (2020). The formation and mineralogy of pegmatites. *American Journal of Science*, 320(5), 717-732.
- Williams D. M.**, & Thompson, L. R. (2018). *Economic geology of pegmatites*. Springer
- Zhang X.**, Chen Z, Rohani S., He M, Tan X, Liu W. (2022) Simultaneous extraction of lithium, rubidium, cesium and potassium from lepidolite via roasting with iron (II) sulfate followed by water leaching. *Hydrometallurgy*, 208, 105820. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105820>