

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA
ESCUELA DE POSGRADO



TESIS

**“OBTENCIÓN DE CARBONATO DE LITIO A TRAVÉS DE
LIXIVACIÓN DEL MINERAL DE ROCAS DE
TOBAS VOLCANICAS DE LA REGIÓN PUNO”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA METALÚRGICA**

**ELABORADA POR:
KATHERINE PORTILLA FLORES**

**ASESOR:
Dra. Ing. ORFELINDA AVALO CORTEZ**

**LIMA - PERÚ
2024**

AGRADECIMIENTOS

A Dios padre, todopoderoso, por concederme la dicha de estar presentando la presente tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Metalúrgica.

A mis padres, **Clemente y Haydeé** (que en paz descanse), por su apoyo diario a mí y a mis hermanos para formarnos en excelentes profesionales, pero sobre todo mejores personas. Gracias, madre, por insistir tanto en continuar hasta el final, espero que desde la Gloria de Dios estes viendo la finalización de esta etapa.

A la **Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica**, FIGMM – UNI, por el apoyo económico al ser la tesis producto del Proyecto de Investigación FIGMM – UNI 2023.

A la Facultad de Ciencias de la **Universidad Nacional de Ingeniería**, UNI, por los análisis de Difracción de Rayos X (DRX) y de Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

Al **Laboratorio de Espectrometría** de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, **FIGMM – UNI**. Por los análisis de espectrometría de absorción atómica.

A mi asesora, la **Dra. Ing. Orfelinda Avalo Cortez**, por su apoyo incondicional a los tesisistas de pregrado y post grado, por su dedicación la implementación del **Laboratorio de Nanomateriales y Metalurgia** y sobre todo guía en el desarrollo de los proyectos de investigación.

A los docentes de la **Unidad de Post Grado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica**, FIGMM – UNI, por la dedicación y esfuerzo en la transmisión de sus conocimientos a las nuevas generaciones y por continuar a pesar de las dificultades como se tuvo debido a la pandemia.

DEDICATORIA

A mi familia, que es todo mi apoyo y motivación, por su tiempo y comprensión durante toda mi vida tanto personal como profesional y sobre todo en los momentos de dificultad. Y en especial a mi madre, aunque no esté físicamente, me sigue motivando para siempre avanzar.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
CAPITULO I: GENERALIDADES	
1.1 Antecedentes bibliográficos	13
1.2 Descripción de la realidad problemática	19
1.3 Objetivos	20
1.4 Hipótesis	21
1.5 Variables e Indicadores	21
 CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1 Bases Teóricas	23
2.1.1 Litio	23
2.1.2 Tipos de fuentes de Litio	25
2.1.3 Principales Minerales de Litio	33
2.1.4 Proyecto de litio Falchani	36
2.1.5 Usos de litio	38
2.1.6 Baterías de litio	44
2.1.7 Tobas volcánicas	45
2.1.8 Procesos para la extracción de litio de minerales de litio	46
2.1.9 Técnicas de Caracterización microestructural	53
2.2 Marco Conceptual	59
 CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1 Descripción de la metodología de investigación	61
3.2 Técnicas e instrumentos de análisis y procesamiento de datos.	62
3.3 Etapas de intervención de estudio	62
3.4 Procedimiento Experimental	62
3.4.1 Pasos del procedimiento experimental	64
3.4.2 Análisis de la formación de Carbonato de Litio	75

	CAPITULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	79
4.1	Análisis de muestra original por Difracción de Rayos X	79
4.2	Análisis de muestra de residuos sólidos por Difracción de Rayos X.	81
4.3	Análisis de los resultados de Difracción de Rayos X.	88
4.4	Análisis de los resultados de las pruebas de lixiviación	89
4.5	Resultados de análisis por microscopia electrónica de barridos (SEM), del carbonato de litio	90
4.6	Validación de Hipótesis	90
	CONCLUSIONES	92
	RECOMENDACIONES	93
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
	ANEXOS	98
	Anexo 1: Matriz de consistencia	99
	Anexo 2: Resultados de laboratorio espectrometría	100
	Anexo 3: Otros	102
	Anexo 4: Curriculum Vitae (español e inglés).....	103

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pegmatitas de Litio	28
Figura 2. Mapa mundial que muestra la ubicación de depósitos seleccionados de salmuera de litio de cuenca cerrada, salmuera de yacimientos petrolíferos enriquecida con litio, salmuera geotérmica, arcilla de litio y zeolita de litio.	30
Figura 3. Modelo conceptual de yacimiento de mineral para salmuera de litio.	32
Figura 4. Ciclo de los iones de litio.	45
Figura 5. Diagrama de flujo general para la producción de compuestos de litio a partir de fuentes minerales.	47
Figura 6. Espectrómetro de Rayos X	54
Figura 7. Espectro electromagnético que muestra el tamaño de la longitud de onda utilizada en la luz, el SEM y el TEM.	57
Figura 8. Imágenes de electrones secundarios de bolas de estaño que muestran un buen contraste con aumentos bajos a muy altos (100000X a 1000000X)	58
Figura 9. Esquema que compara los modos de formación de imágenes en los microscopios óptico, de transmisión y electrónico de barrido.	59
Figura 10. Muestra original de Toba Volcánica de meseta Macusani	63
Figura 11. Conversión de la muestra original a “polvo” empleando mortero.	63
Figura 12. Muestra X1 a analizar por DRX y muestra M2 por SEM	64
Figura 13. Esquema del Procedimiento Experimental	64
Figura 14. Pesaje de la muestra original de litio en 10gr	65
Figura 15. Pesaje de la muestra original de litio en 10gr en 4 crisoles a las cuales se le agregó 2gr de CaCO_3 , 2gr de Na_2CO_3 , 2gr de Na_2SO_4 y 2gr de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	66
Figura 16. Se preparó 2 crisoles con 10gr de tobas volcánicas de litio, a las cuales se le adicionó: 2gr de CaCO_3 + 4gr de Na_2SO_4 y 2gr de Na_2CO_3 + 4gr de CaSO_4 .	66
Figura 17. Tostación de las 6 muestras en horno tipo Mufla a 900°C por 1 hr.	67

Figura 18.	Muestras sometidas a tostación a 900°C por 1hr y luego retiradas del horno tipo mufla.	67
Figura 19.	Muestras con contenido de carbonato y sulfato sometidas a tostación a 900°C por 1hr y luego retiradas del horno tipo mufla.	68
Figura 20.	Pesaje de las muestras calcinadas y luego se le adicionó agua destilada en la proporción 1:4	69
Figura 21.	Vasos de precipitados conteniendo las muestras tostadas a 900°C por 1hr y adicionadas con agua destilada colocadas en Plancha de Calentamiento con Agitación Magnética.	69
Figura 22.	Proceso de lixiviación fue realizado a 85°C por 60 minutos	70
Figura 23.	Filtrado de las pruebas de lixiviación, soluciones liquidas en matraces.	70
Figura 24.	Residuos sólidos húmedos de la lixiviación en papeles de filtro.	71
Figura 25.	Pesaje de las 2 muestras calcinadas y luego se le adicionó agua destilada en la proporción 1:4	71
Figura 26.	Proceso de lixiviación fue realizado a 85°C por 60 minutos en planchas de calentamiento con agitación magnética.	72
Figura 27.	Residuos sólidos húmedos en papeles de filtro y luego fue-ron colocados en estufa para su secado a 80°C por 4hr.	72
Figura 28.	Pesaje de 12 gr de muestra N°7 y agua para la lixiviación	73
Figura 29.	Proceso de lixiviación en manta calentadora a 85°C por 60 min de la muestra N°7.	74
Figura 30.	Muestras N°8 y N°9, llevadas con agua destiladas en vasos precipitados al equipo de baño de ultrasonido.	74
Figura 31.	Proceso de lixiviación de baño ultrasonido lixiviando a 60°C por 60 min	75
Figura 32.	Verificación del pH de la solución lixiviada.	76
Figura 33.	Preparación de carbonato de litio empleando Na_2CO_3 y calentando a 45 °C por 60 min a 300RPM.	76
Figura 34.	Formación de precipitado al finalizar el proceso de lixiviación con agitación y temperatura.	77
Figura 35.	Filtración del precipitado obtenido al formar carbonato de litio empleando Na_2CO_3 .	77
Figura 36.	Pesaje del carbonato de litio obtenido empleando Na_2CO_3 .	78
Figura 37.	Carbonato de litio en envase para su envío para analizar por SEM y verificar su composición y morfología.	78

Figura 38.	Difractograma DRX de la muestra D11 de la toba volcánica	79
Figura 39.	Análisis del Difractograma DRX de la muestra D11 en PROFEX	80
Figura 40.	Difractograma DRX de la muestra D08 de la prueba N°7 en la Manta Calentadora con Agitación Magnética.	81
Figura 41.	Análisis del Difractograma DRX de la muestra D8 en PROFEX	82
Figura 42.	Difractograma DRX de la muestra de residuo D09 de la prueba N°8 en Baño Ultrasonido con sulfato de sodio y carbonato de calcio.	84
Figura 43.	Análisis del Difractograma DRX de la muestra D9 en PROFEX	84
Figura 44.	Difractograma DRX de la muestra de residuo D10 de la prueba N°9 realizada en Baño Ultrasonido con sulfato de calcio y carbonato de sodio.	86
Figura 45.	Análisis del Difractograma DRX de la muestra D10 en PROFEX	87
Figura 46.	Análisis por SEM del carbonato de litio formado con la adición de carbonato de sodio.	90

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla N°1. Propiedades del Litio.	25
Tabla N°2. Tipos de fuentes de Litio.	26
Tabla N°3. Principales minerales que contienen litio.	26
Tabla N°4. Fases de producción por etapas.	38
Tabla N°5. Usos de Litio.	39
Tabla N°6. Perfiles experimentales y resultados de varios estudios sobre el procesamiento de la espodumena.	48
Tabla N°7. Perfiles experimentales y resultados de varios estudios sobre el procesamiento de lepidolita.	49
Tabla N°8. Perfiles experimentales y resultados de varios estudios sobre el procesamiento de arcillas y otras fuentes.	53
Tabla N°9. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D11.	80
Tabla N°10. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D08.	82
Tabla N°11. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D09.	85
Tabla N°12. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D10.	87
Tabla N°13. Comparación de % peso de la muestra original de toba volcánica con los residuos de pruebas.	88
Tabla N°14. Resultado de Análisis por Absorción Atómica de Soluciones Lixiviadas.	89

RESUMEN

Con más de 30 años de comercialización de baterías de litio y con una demanda en aumento por ser una alternativa sostenible ante las fuentes combustibles tradicionales, es esencial confirmar la obtención de carbonato de litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la Región Puno. Las metodologías usadas en la experiencia fueron: Chancado con mortero, caracterización por Difracción de Rayos X, pruebas de Tostación en Horno tipo Mufla de la muestra en polvo con reactantes, pruebas de Lixiviación empleando: planchas de calentamiento con agitación magnética, manta calentadora con agitación y baño de ultrasonido, haciendo uso de agua destilada; Análisis por Absorción Atómica de las soluciones lixiviadas, DRX de los residuos sólidos del proceso de lixiviación y finalmente formación del Carbonato de Litio y análisis de sus partículas por SEM. La tostación con los reactantes se realizó por 1 hora a 900°C para todas las muestras. Se verificó que se obtuvo carbonato de litio, gracias a análisis SEM, la verificación de las extracciones de litio se hicieron a través de los resultados del análisis de absorción atómica, los cuales para las muestras realizadas con plancha de calentamiento y agitación magnética a 85°C por 1 hora resultaron: CaCO_3 (5.1 mg/L), Na_2CO_3 (5.1 mg/L), Na_2SO_4 (137.1 mg/L), CaSO_4 (6.1 mg/L), $\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{CaSO}_4$ (127.4 mg/L), $\text{CaCO}_3+\text{Na}_2\text{SO}_4$ (122.7 mg/L). Para la muestra lixiviada en manta calentadora con agitación magnética a 85°C por una hora con Na_2SO_4 (901.15 mg/L), para las muestras lixiviadas en baño de ultrasonido a 60°C por 1 hora: $\text{CaCO}_3+\text{Na}_2\text{SO}_4$ (660.34 mg/L) y $\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{CaSO}_4$ (693.37 mg/L).

Palabras claves: Litio, lixiviación, Puno, tobas volcánicas, carbonatos, sulfatos.

ABSTRACT

With more than 30 years of marketing lithium batteries and with an increasing demand for being a sustainable alternative to traditional fuel sources, it is essential to confirm the obtaining of lithium carbonate from volcanic tuff mineral in the Puno Region. The methodologies used in the experience were: Crushing with mortar, characterization by X-ray diffraction, roasting tests in a muffle furnace of the powder sample with reactants, Leaching tests used: heating plates with magnetic stirring, heating mantle with stirring and ultrasound bath, using distilled water; Analysis by Atomic Absorption of the leached solutions, DRX of the solid residues of the leaching process and finally formation of Lithium Carbonate and analysis of its particles by SEM. The roaster with the reagents was carried out for 1 hour at 900 ° C for all samples. It was verified that lithium carbonate was obtained, thanks to SEM analysis, the verification of the lithium extractions was made through the results of the atomic absorption analysis, which for the samples made with a heating plate and magnetic stirring at 85 ° C for 1 hour resulted: CaCO_3 (5.1 mg / L), Na_2CO_3 (5.1 mg / L), Na_2SO_4 (137.1 mg / L), CaSO_4 (6.1 mg / L), $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaSO}_4$ (127.4 mg / L), $\text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ (122.7 mg / L). For the sample leached in a heating mantle with magnetic stirring at 85°C for one hour with Na_2SO_4 (901.15 mg/L), for the samples leached in an ultrasound bath at 60°C for 1 hour: $\text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ (660.34 mg/L) and $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaSO}_4$ (693.37 mg/L).

Keywords: Lithium, leaching, Puno, volcanic tuffs, carbonates, sulphates.

INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, la demanda del litio pasó a duplicarse y según análisis actualmente es muy probable que para el año 2030 se requiera aproximadamente el doble de la demanda actual. El consumo de carbonato de litio resulta de un requerimiento a nivel mundial de fuentes de energías más amigables con el ambiente. Así, a corto y mediano plazo la necesidad se centra en baterías recargables de ion-litio, principalmente para vehículos eléctricos (VE).

Los recursos de litio que se tienen en la Región de Puno, en la meseta de Macusani, están a menos de dos millones de toneladas a ser el tercer lugar de las minas más grandes de litio en roca a nivel mundial. De esta manera, ser uno de los principales productores de carbonato de litio y con ello, ser parte de la cadena de suministro global de batería es una ambición del país. Por otro lado, en el conocido triangulo del litio de Sudamérica se procesa mineral de litio de otra fuente, que son las salmueras y no la roca sedimentaria como es el caso del mineral de tobas volcánicas de la región de Puno. Sin embargo, se posee literatura de procesos metalúrgicos de obtención de litio según el mineral de litio que se tiene y son de apoyo para en la estructuración de pruebas de obtención en laboratorio.

Existe la problemática actual de una necesidad mundial de dejar de depender de energía de fuentes combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. Así, disminuir las emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero. Por tanto, el desarrollo de esta tesis se justifica debido al requerimiento de la viabilidad de procesos metalúrgicos para la obtención de carbonato de litio (especie comercializada) a través de un proceso metalúrgico de rocas de las tobas volcánicas de la Región de Puno. Así, el objetivo general de la presente tesis fue obtener carbonato de litio de las tobas volcánicas mediante proceso de tostación y lixiviación. Así mismo, se realizó en la etapa de tostación una variación de uso de reactantes: carbonatos de calcio y sodio, sulfatos de calcio y sodio y sus combinaciones, teniendo las pruebas como reactante al sulfato de sodio un mejor performance. Además, se realizó una variación en la etapa de lixiviación al realizar el proceso de tres maneras diferentes que fueron: con planchas de calentamiento con agitación magnética, manta calentadora con agitación y baño de ultrasonido.

CAPITULO I : GENERALIDADES

1.1 Antecedentes bibliográficos.

1.1.1 Antecedentes referentes a Yacimientos No Convencionales

Marcinov, V., et al. (2023) describen la producción de litio a partir de raíces primarias y secundarias, enfocando el reciclaje industrial de baterías de iones de litio y concentrarse en antecedentes sobre métodos mecánicos e hidrometalúrgicos de reciclaje. Usualmente el tratamiento hidrometalúrgico se enfoca principalmente en la lixiviación y extracción de Li de las soluciones. Estos procesos incluyen precipitación, extracción por solventes, intercambio iónico y electrodiálisis, entre otros. Mencionando, además, que la coprecipitación posterior de la lixiviación acarrea una pérdida del litio de 30%, la cual disminuye a un 15% a través del proceso de extracción por solventes. Finalmente, observó que para concentrar el Li se requieren operaciones costosas y evitables debido a la alta solubilidad del Li_2CO_3 (1,5 g/L) y las altas proporciones de lixiviación de líquido a sólido. Como resultado, se recomienda que más investigaciones se centren en la lixiviación en múltiples etapas con relaciones L/S más bajas.

Alvarez Juarez, Z. (2022) estableció que la lixiviación de Li se obtuvo a través de: la digestión del sulfato de litio con ácido sulfúrico concentrado a 250°C y la lixiviación con agua a 60 °C. Estos lixiviados de litio contienen impurezas como el hierro, aluminio, el manganeso, calcio, magnesio, silicio, potasio y sodio que fueron eliminados por procesos de precipitación. Con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a concentración de 80 g/L, se realizaron precipitaciones a pH 5, 8 y 11. A pH 11, la mayoría de las impurezas se eliminaron al 99.99 %. El K y Na no fueron eliminados por precipitación, se cristalizaron como cloruros en el proceso de evaporación. El Li se obtuvo por evaporación por 240 minutos de 545 mg/L hasta 15 g/L. El tiempo, las temperatura y velocidad de evaporación fueron las variables de operación tomadas. La purificación de los lixiviados por evaporación y el análisis por absorción atómica de la

solución purificada fueron las metodologías a seguir. Los hallazgos indicaron que las impurezas más altas en una solución purificada y concentrada de litio fueron Al 0,8 mg/L, Ca 0,05 mg/L, Mg 0,4 mg/L, Fe 0,01 mg/L, Mn 0,01 mg/L, Na 0,06 mg/L y K 0,04 mg/L.

Hanco Quispe, O. C. (2022) mencionó que las rocas volcánicas de Falchani surgen en las laderas y están estructuradas por cuarzo hidrotermal, arcillas rosado claro a blancas y biotita. La concentración de Li va entre 2000 ppm a 4000 ppm de Li en las tobas riodacíticas que es donde se presenta, por otro lado, las riolitas poseen elevadas concentraciones de fosfato uranil cálcico hidratado, llegando a 600 ppm. El mineral de litio con mayor presencia es la lepidolita, una mica rica en Li que se observa. a un aumento de 20 μm y que se encuentra esparcida por la toba. La toba arcillosa a lo largo de la meseta de la zona minera de Falchani está cubierta por una serie de rocas ígneas de entre 15 y 55 metros de espesor. El espesor de la toba lítica varía entre 30 y 130 micrones, con un promedio común de 80 micrones.

Quille Calizaya, G. (2022) estableció que la especie de litio de Macusani en la Región Puno - Perú, ha estimado un recurso de más de 4.5 millones de toneladas en forma de Li_2CO_3 con una ley de 3500 ppm de Li y la obtención del Li_2CO_3 será a través de lixiviación, concentración, vaporación y precipitación. El proceso inicia con el mineral llegando a una granulometría de hasta 87 % malla -200. Luego de la tostación de mineral de litio, con H_2SO_4 concentrado a temperatura de 250 °C se llegó a lixiviar y obtener Li_2SO_4 , la extracción alcanzó al 93 % de Li, y también la disolución del mineral con NaF y H_2SO_4 en autoclave a T de 125 °C, alcanzó al 92 %. En la segunda fase con uso de cal, las impurezas fueron sustraídas al 99,92 %, sin embargo, se aumentó el % de Ca debido a ello, la concentración de este elemento fue eliminado por precipitación con $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$. Luego de la depuración, se concentró el Li por vaporación de 1,2 g/L hasta 18,7 g/L de litio. El precipitado de Li se realizó con Na_2CO_3 a temperatura de 95 °C, obteniéndose Li_2CO_3 calidad de 98,80.

Por otro lado, **Nina Gonzales, M. R. (2022)** determinó en su estudio la extracción de hasta 91% de Litio de mineral de roca del Yacimiento Falchani fue obtenido a través de una lixiviación con ácido sulfúrico y cloruro de sodio en autoclave (alta presión de 0,2 MPa) a temperaturas elevadas (hasta 125 °C) y por tiempos que llegaron a los 180 minutos. Así mismo, en su caracterización se pudo observar altas leyes de aluminio, cesio y rubidio con valores de alcance monetario.

Anteriormente, **Zapana Yanarico, R. (2020)** realizó un programa de lixiviación utilizando diferentes series de pruebas metalúrgicas para evaluar el comportamiento y obtener superiores extracciones de Li. La muestra utilizada tuvo una ley de cabeza en Li de 3171 g/t, equivalente a 0,68% de óxido de litio. Los métodos sugeridos en este estudio incluyeron caliza y yeso, intercambio iónico con Na_2SO_4 , lixiviación directa con HCl y lixiviación directa con H_2SO_4 . Los hallazgos experimentales indican que las técnicas de lixiviación directa con los ácidos fueron las más efectivas para obtener altas extracciones de litio, aproximadamente el 90 %, las extracciones de Cs y Rb fueron superiores al 70%. La extracción con yeso y caliza del litio no superó el 3%. Por otro lado, el método de intercambio iónico logró una extracción de litio del 75% y el beneficio de obtener bajos contenidos de contaminantes en la solución rica de lixiviación (PLS).

Alatorre y Santillán (2019) establecieron que existen 03 clases de yacimientos del litio en la corteza terrestre: primero, están los yacimientos convencionales, económicos que a través del tiempo han evidenciado ser de gran beneficio, y hay dos variantes: en salmueras continentales y en pegmatitas llamados también “hard rock” o de roca dura. Seguidamente están los yacimientos potenciales que tienen Li en arcillas donde bastantes proyectos y en distintas fases de exploración, algunos incluso a nivel de estudio de factibilidad que pueden dar a entender su eventual potencial económico. Finalmente, los no convencionales engloban Li en salmueras petroleras o en salmueras geotérmicas que hasta el momento en ninguna parte del mundo son explotadas y aún no se conoce su viabilidad.

Martí Moscoso, J. M. (2019) concluyó en su trabajo que se tienen los principales yacimientos de Li en Chile, Perú, Argentina y Bolivia. Para tal aseveración se tuvo en cuenta los siguientes requisitos: las superficies de los yacimientos, reserva de Li, concentración de Li, ratio de vaporación, relación Mg/Li y la relación K/Li. Jerarquizando estos yacimientos, basado en variables técnicas y morfológicas, para estipular la importancia relativa técnico – económica y así determinar su potencial. Para el procesamiento de salmueras de Li, éste estudió concluyo que los mejores yacimientos son los encontrados en Chile y Bolivia. Por otro lado, se evidenció que no existe un estándar aprobado internacionalmente para la declaración de recursos y reservas de Li extraído a partir de salmueras, por tanto, se requiere de cautela y criterio en la revisión de dichas reservas.

Vásquez Cordano, A. (2018) mencionó que la revolución energética de la actualidad que viene dándose en las últimas décadas ha concedido abrir las puertas a fuentes de generación renovable en las matrices de producción eléctrica y fomentó la inclusión de vehículos eléctricos en el parque vehicular de varios países. De este modo, su artículo atribuye que la revolución antes mencionada ha causado una crucial demanda de los principales metales tecnológicos necesarios para la fabricación de las tecnologías renovables y los vehículos eléctricos, entre los que resalta el Litio, principal material de baterías y acumuladores eléctricos necesarios para la producción de energía renovable y mantener la movilidad de la electricidad. Si bien es cierto que las reservas de litio estarán disponibles al menos para los próximos 50 años, poco antes de 2021, el mercado del Li_2CO_3 tendrá un importante exceso de demanda de unas 46 mil toneladas debido al actual auge de este. Esta escasez de suministro mantendrá los precios del litio por encima de los 14,000 dólares por tonelada, según las últimas previsiones de consultoras como MacQuarie Research. El Perú tiene potencial en este marco del boom del Litio, sin embargo, en la región de Puno, donde se encuentra los recursos de Li, se tienen desafíos por superar como son. a) el cambio de autoridades regionales y locales durante este año 2019, b) el desarrollo técnico y la posible aparición de sustitutos del Li en la producción de pilas y acumuladores, c) la crisis política en el Perú provocada por el

conflicto entre el congreso, poder ejecutivo y poder judicial , d) la necesidad de actualizar el marco regulatorio que normalice el uso de metales radiactivos y e) la demanda de una cadena logística que asegure el transporte del litio para su monetización, lo que beneficia al estado y la región, y que podría cuadruplicar montos en 10 años.

1.1.2 Antecedentes referentes a Yacimientos Convencionales

Villa Canaviri, G. A. (2023) mencionó que la gran reserva de Li de Bolivia posee un contenido superior de Mg al comparar con salares convencionales, lo que significa un obstáculo en su extracción. La indagación se basó en la electrodiálisis para disminuir la correlación Mg/Li y acentuar la concentración de Li en una salmuera artificial que simula la constitución química de la salmuera del Salar de Uyuni. Con un diseño experimental de tipo 2^2 y teniendo como variables autónomas: el caudal y el voltaje, además como parámetros controlados: el pH, la temperatura y la concentración inicial; se tuvieron como resultados una disminución de la correlación Mg/Li 1 de 4,84 a 7,86 y la concentración de Li aumentó de 103,6 a 201,1 ppm. Ello, con un costo en laboratorio de 45,2 \$/kg.

Sánchez Ramírez, M. C. et al. (2021) establecieron que el litio puede ser un mineral que represente soluciones en temas como salud, tecnologías de la información, comunicaciones o movilidad, De hecho, señalaron que puede ser tan importante para el desarrollo humano como en su momento lo fue el petróleo. Además, los yacimientos localizados en el territorio nacional pueden brindar un volumen importante en cuanto a la explotación de este elemento, por lo que diferentes tópicos de regulaciones y las reglas para el manejo de residuos tóxicos son analizadas en ambas Cámaras del Poder Legislativo.

Chamay Pando (2019) escudriñó acerca de los métodos de extracción de Li en yacimientos mineros que mayoritariamente son salmueras. Para tal fin, analizó artículos científicos de los años 2004 – 2019 en revistas indexadas a la extracción de Li. Las fuentes fueron diversas, como Google Académico,

Redaly, páginas web; artículos y tesis de interés y todo en español. De lo encontrado, se verificó que el litio se extrae drenando un agua salada del subsuelo de las salinas, luego se deja secar al sol y se elabora, sobre el material seco, distintas precipitaciones para finalmente adicionar Na_2CO_3 que forma Li_2CO_3 . Se concluye que método descrito es el normalmente usado, aún con sus imperfecciones, pero puede progresar.

Velasco Velarde, A. C. (2019) tuvo como objeto de estudio la obtención de carbonato de Li, a partir de las salmueras rezagadas del Salar Uyuni de Bolivia. En un primer paso, se precipitó con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, logrando apartar todo el Mg de la salmuera, sin embargo, se saturó de Ca y perdiendo el casi 20% de Li. Seguidamente, se realizó una sulfatación con Na_2SO_4 que, aunque usando en exceso no se logró precipitar todo el Ca y como etapa se desperdició cerca de 30% de Li. Finalmente, a través de obtención de carbonato, se obtuvo una sal de Li_2CO_3 (0,18) y CaCO_3 (0,82) debido a la alta saturación de Ca. La correlación magnesio/litio de 22:1 de la salmuera rezagada tuvo como resultado un complicado y caro proceso si se sigue con la ruta convencional, por lo cual, se mencionó el requerimiento de mayor estudios y pruebas.

Tam Tran y Van T. Luong (2015) establecieron que el procesamiento para tratar mineral de litio de roca dura implica en primer lugar un proceso térmico a altas temperaturas y posteriormente una lixiviación con agua para obtener una solución con valores de Li. En el caso de salmueras o salares, se procede con una vaporación solar en búsqueda de concentrar el Li y precipitar las sales de magnesio, potasio, sodio, calcio, etc. Luego, las salmueras concentradas y las soluciones lixiviadas se procesan a través de intercambio iónico, precipitación, etc. Obteniendo finalmente Li_2CO_3 y LiOH con purezas de hasta 0,995 (baterías) y pasar por pasos como la redisolución para llegar a purezas mayores de 0,999. Las salmueras de salar, para en el 2015, la principal fuente de producción de compuestos de Li en el mundo debido a la superioridad en reservas y menor costo de operación.

1.2 Descripción de la realidad problemática

El desarrollo de la minería de litio en Perú es una tendencia reciente impulsada por el creciente interés mundial en las energías limpias y la electrificación del transporte. El litio, componente esencial en las baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos y almacenamiento de energía, se ha convertido en un recurso estratégico a nivel global. (Cochilco 2020)

Perú, conocido principalmente por su riqueza en minerales como el cobre y el oro, ha comenzado a explorar y desarrollar sus reservas de litio. Uno de los proyectos más destacados es el de Macusani, ubicado en la región de Puno, gestionado por la empresa canadiense American Lithium Corp. Este yacimiento ha mostrado resultados prometedores, posicionando a Perú como un potencial actor importante en el mercado global del litio. Sin embargo, las reservas que se tienen son de fuente de rocas sedimentarias, que son la fuente en menor proporción a nivel mundial y por tanto menor estudiada y explotada.

1.2.1 Formulación del problema.

1.1.2.1 Formulación del problema general.

La problemática general es el requerimiento mundial de dejar de depender de energía de fuentes combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. Así, disminuir las emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero.

1.1.2.2 Formulación de los problemas específicos

1. ¿Puede un proceso metalúrgico extraer Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno, siendo esta fuente mineral poco tratada a nivel mundial?

2. ¿Puede variarse los reactantes del proceso metalúrgico de extracción de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno, y evidenciar con cuál se obtiene mayor eficiencia?

3. ¿Puede obtenerse carbonato de litio a partir de tobas volcánicas como única fuente de recursos de Litio descubierta hasta el momento para la Región Puno y el Perú?

1.2.2 Justificación e importancia de la investigación

1.2.2.1 Justificación.

La presente tesis se justifica debido al requerimiento de la viabilidad de procesos metalúrgicos para la obtención de carbonato de litio (especie comercializada) a través de un proceso metalúrgico de rocas de las tobas volcánicas.

1.2.2.2 Alcances.

El presente estudio tuvo un alcance en pruebas de laboratorio de la obtención de carbonato de Litio a partir de Tobas Volcánicas provenientes de la zona de Falchani en Puno. Al ser proveniente de un proyecto de investigación netamente Metalúrgico, no se ha estudiado otro tipo de rentabilidades, llámese social y ambiental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

El objetivo general es obtener carbonato de litio mediante proceso de chancado y lixiviación de rocas de tobas volcánicas.

1.3.2 Objetivos específicos.

1. Realizar pruebas de chancado de muestra, caracterización mineralógica de la muestra por: Difracción de Rayos X, Fluorescencia de rayos-X y Microscopia Electrónica de Barrido. Pruebas pirometalúrgicas de tostación, pruebas hidrometalúrgicas de lixiviación para extraer el litio. Y finalmente, analizar la solución lixiviada para evidenciar la concentración de Litio a través de absorción atómica.

2. Realizar pruebas de chancado, tostación, pruebas hidrometalúrgicas de lixiviación para extraer el litio, variando los reactantes y los métodos de lixiviar en laboratorio. Y finalmente, analizar la solución lixiviada de cada experiencia para evidenciar la variación de concentración de Litio a través de absorción atómica y obtener la eficiencia por cada una de las experiencias.

3. Realizar pruebas de chancado, tostación, lixiviación al mineral de tobas volcánicas de la Región Puno y finalmente con la solución lixiviada obtener carbonato de litio.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general.

La hipótesis general es que, a partir de mineral de tobas volcánicas de la región de Puno, se logrará obtener carbonato de litio por proceso hidrometalúrgico, previa tostación con el uso de reactante y agua destilada.

1.4.2 Hipótesis específicas.

1. Se obtiene solución lixiviada de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno luego de un procesamiento de chancado, tostado y lixiviación.

2. Se obtiene soluciones lixiviadas con diferente concentración de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno luego de un procesamiento de chancado, tostado y lixiviación, variando los reactantes y los métodos de lixiviar en laboratorio.

3. Se obtiene carbonato de Litio a partir de solución lixiviada obtenida a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno luego de un procesamiento de chancado, tostado y lixiviación.

1.5 Variables e Indicadores

1.5.1 Variables independientes y sus indicadores

Variable X1: Presencia de litio en las tobas volcánicas de mineral Falchani de la región de Puno.

Variable X2: Reactivos con antecedentes de obtención de Li.

Indicador X1: Caracterización por difracción de rayos X.

Indicador X2: Uso de reactantes para el proceso de tostación.

1.5.2 Variables dependientes y sus indicadores

Variable Y1: mg/L de Litio obtenidos en la solución de lixiviación.

Variable Y2: morfología de las partículas de carbonato de litio obtenidas.

Indicador Y1: Análisis por absorción atómica de solución luego de lixiviación.

Indicador Y2: Análisis de muestra final por microscopia electrónica de barrido (SEM).

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Bases Teóricas.

2.1.1. Litio

El litio viene de la palabra griega LITHOS que es sinónimo de piedra. Es un elemento metálico, blanco-plateado y químicamente reactivo; es el más ligero en peso de todos y de bajo punto de fusión, se halla en 145 especies mineralógicas, siendo las de valor económico; espodumena, amblygonita, lepidolita y petalita. (Dana, 1959).

En el 2024, F. Spellman en su libro La Ciencia del Litio hace un recuento de las características del Litio y de sus compuestos más importantes, mencionando así que el litio fue descubierto en 1817 por Johan August Arfvedson al examinar una Petalita y por su nombre “que significa piedra en griego” probablemente por haber sido descubierto en minerales en contraposición del sodio y potasio que provenían de plantas.

A) Estructura Atómica del Litio

Un átomo de litio neutro tiene tres protones y tres electrones. En la tabla periódica, el período o fila de un elemento indica cuántos niveles de energía ocupan los electrones de sus átomos. El litio está en el período 2, lo que indica que los tres electrones del elemento se encuentran en dos niveles de energía. En el primer nivel de energía se mantienen dos electrones. El último electrón se encuentra en el segundo nivel de energía, el más externo. Teniendo en cuenta que los electrones que se encuentran en el nivel de energía más externo de un átomo se denominan electrones de valencia. Los electrones de valencia son importantes porque son los electrones que participan en los enlaces químicos con otros átomos.

B) Compuestos de Litio

Se pueden usar muchas sales de litio diferentes como medicamentos, incluidos carbonato de litio, acetato de litio, sulfato de litio, citrato de litio,

orotato de litio y gluconato de litio. Tenga en cuenta que el litio en forma pura tiene usos limitados pero importantes, pero los compuestos de litio como el carbonato de litio, el estearato de litio y el hidróxido de litio se utilizan ampliamente en la vida cotidiana y se describen brevemente a continuación.

(1) Carbonato de Litio

El carbonato de litio (Li_2CO_3), que solo se encuentra en estado anhidro, es la sal blanca de litio del carbonato y es un compuesto inorgánico ampliamente utilizado en el procesamiento de óxidos metálicos. El carbonato de litio se extrae principalmente de la espodumena en depósitos de pegmatita y de las sales de litio de depósitos subterráneos de salmuera. Se agrega carbonato de litio al vidrio o la cerámica para fortalecer los materiales. Los utensilios de cocina de vidrio Pyrex™ son un buen ejemplo de dónde se utiliza carbonato de litio. También se utiliza en espejos y lentes para telescopios. El carbonato de litio también se utiliza para extraer aluminio metálico de minerales de aluminio. El uso principal del carbonato de litio es en baterías de iones de litio, donde sus compuestos se utilizan como cátodo y electrolito. Ya en la década de 1840, el carbonato de litio se usaba para tratar cálculos en la vejiga, y en la década de 1850, las sales de carbonato de litio se usaban para tratar la lechada, los cálculos urinarios, el reumatismo, la manía, la depresión y el dolor de cabeza. En la década de 1940, el carbonato de litio se convirtió en un tratamiento común para el trastorno bipolar.

(2) Estearato de Litio

El estearato de litio ($\text{LiC}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2$) es un polvo sólido blanco que se mezcla con petróleo para producir una grasa lubricada pesada que se utiliza en muchas máquinas industriales; también se utiliza en la elaboración de jabones. La grasa no se descompone a altas temperaturas y no se endurece a bajas temperaturas. Tampoco reacciona con el oxígeno del aire o del agua, por lo que su composición química tiene una larga vida útil.

(3) Hidróxido de Litio

El hidróxido de litio (LiOH) es un compuesto orgánico que puede existir anhidro o hidratado y que es usado para absorber dióxido de carbono.

C) Propiedades Físicas del Litio

En la **Tabla N°1** se puede observar las propiedades físicas del Litio. El litio no es una tierra rara; está ampliamente diseminado en la naturaleza ocurriendo en muchas rocas, suelos y en las aguas naturales en forma de trazas. El promedio de Litio en la corteza terrestre debe estar en promedio en 20 ppm y en las aguas de mar contiene 0,18 ppm.

Tabla N°1. Propiedades del Litio.

Propiedad	Valor
Masa atómica	6,941 g
Densidad	0,535 g/cm ³
Número atómico	3
Símbolo atómico	Li
Aspecto	Blanco plateado
Radiancia atómica	152 pm
Punto de fusión	180,5 °C (356,9 °F)
Punto de ebullición	1342 °C (2448 °F)
Punto crítico	3220 K, 67 MPa
Calor de fusión	3,00 kJ/mol
Calor de vaporización	136 kJ/mol
Capacidad calorífica molar	24,860 j/(mol·K)
Estado de oxidación	1
Electronegatividad	0,98 (Escala de Pauling)
Configuración electrónica	[He]2s ¹

Fuente: Spellman, F. (2024)

2.1.2. Tipos de fuentes de Litio

Para Cochilco (2020) en general existen tres fuentes explotables de litio en el mundo, entre las que mencionan: Mineral de roca o pegmatitas (espodumeno), salmueras (típicos reservorios acuosos continentales) y de rocas sedimentarias. En la **Tabla N°2** se muestra la catalogación de estas 3 clases según tipo de depósito, estado natural, % de representatividad en el

mundo. En la **Tabla N°3** se puede observar los principales minerales que contienen litio para Dessemond (2019).

Tabla N°2. Tipos de fuentes de Litio.

Fuente	Tipos de depósitos	Particip. (%)	Estado natural	Ubicación de mayores depósitos
Pegmatitas	Espodumento, petalitas, lepidolitas, amblogonita y eucryptita.	26%	Roca dura (a partir de magma cristalizado sobre la corteza terrestre)	Australia, EEUU, RCD y Canadá
Salmueras	Continetales, geotermale y petrolíferos.	66%	Salmuera (arena, agua y sale minerales)	Triángulo del Litio (Chile, Argentina y Bolivia)
Rocae sedimentariae	Arcillae, tobae volcánicae, rocae evaporitae lacustre	80%	Rocae de minerales de Esmectita (arcilla), jaradita (evaporita lacustre)	EE. UU., México, Serbia (Jadar) y Perú (Falchani)

Fuente: Cochilco (2020).

Tabla N°3. Principalee mineralee que contienee litio.

Mineral	Formula	Contenido teórico de Li (%)
Espodumena	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	3.73
Petalita	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	2.27
Eucryptita	LiAlSiO_4	5.51
Bikitaíta	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	3.4
Lepidolita	$\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$	~3.84
Zinnwaldita	$\text{KLiFeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$	1.59
Ambligonita	$(\text{Li}, \text{Na})\text{AlPO}_4(\text{OH}, \text{F})$	4.73
Montebrasita	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH})$	1 a 4
Litiofilita	LiMnPO_4	4.43
Trifilita	LiFePO_4	4.4
Hectorita	$\text{Na}_{0,3}(\text{Mg}, \text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	~1.93
Jaradita	$\text{LiNaAlSiB}_2\text{O}_7(\text{OH})$	2.85
Zabuyelita	Li_2CO_3	18.79
Elbaíta	$\text{Na}(\text{Li}_{1,5}\text{Al}_{1,5})\text{Al}_6\text{Si}_6\text{B}_3\text{O}_{27}(\text{OH})_4$	1.11

Fuente: Dessemond, Colin. (2019)

A) Pegmatitas de Litio-Cesio-Rubidio (15 D)

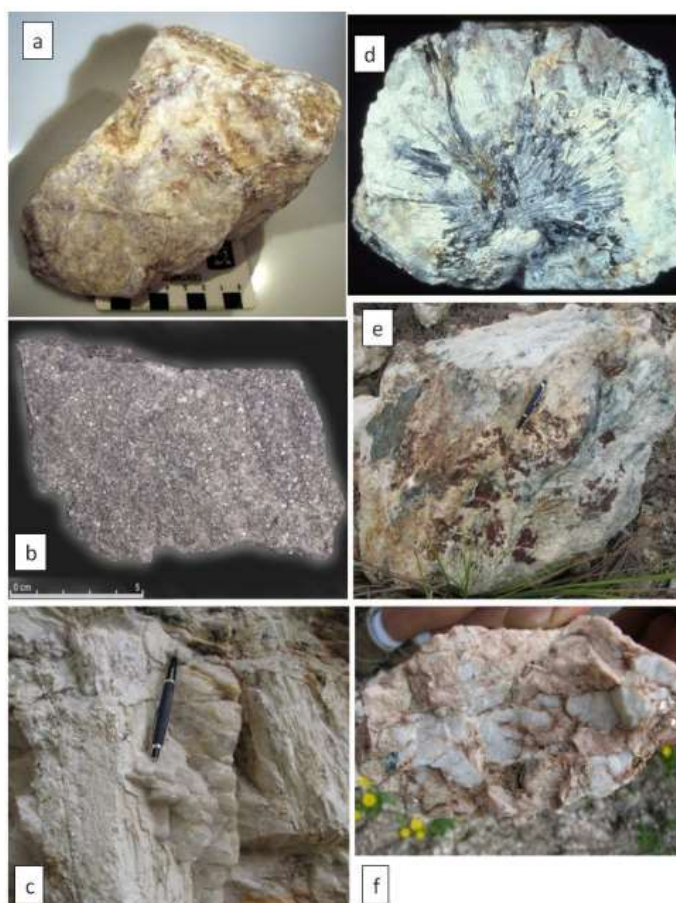
Para Dill (2015) los depósitos de pegmatitas de Litio se encuentran con Cesio y Rubidio. El potasio y el sodio son elementos comunes en las pegmatitas y pertenecen a los "diez elementos principales" de la corteza terrestre con 20,900 ppm de potasio y 23,600 ppm de sodio. Ambos elementos están presentes en una amplia gama de minerales formadores de rocas, en pegmatitas, principalmente en feldespatos alcalinos y mica. La ley media en la corteza terrestre de otros tres elementos alcalinos: rubidio, litio y cesio, también comunes en las pegmatitas, es de 90 ppm de Rb, 20 ppm de Li y 2 ppm de Cs, respectivamente. Si bien el Rb^+ a menudo sustituye al K^+ en algunos de sus minerales, los minerales de rubidio propios, como la rubiclina $(\text{Rb},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ y la voloshinita $\text{RbLiAl}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}\text{F}_2$, son rarezas. Esto también es válido para los minerales de Cs, excluyendo la polucita, que es común en algunas pegmatitas (**Figura 1a**). El litio, sin embargo, se encuentra en una amplia gama de silicatos, los más conocidos son la espodumena y la holmquistita, un anfíbol de litio, en Li turmalina s.s.s. y Li mica s.s.s. (**Figura 1a, b, c, d**). Se clasifican como minerales mena para el litio. Esto también es cierto para algunos fosfatos que contienen Li, como la trifilita y los miembros de la ss montebrasita-ambligonita (**Figura 1e, f**). La abundancia de litio en diferentes rocas magmáticas deja poco espacio para otra fuente que no sea la corteza: rocas ultrabásicas: 0.x ppm Li, rocas básicas: 17 ppm Li, rocas intermedias: 20 ppm Li, sienita: 28 ppm Li, granito: 40 ppm Li.

B) Depósitos de salmuera de litio en cuencas cerradas.

Para la USGS (2017) los depósitos de salmuera de litio son acumulaciones de agua subterránea salina enriquecidas con litio disuelto. Las ubicaciones de los principales depósitos de salmuera de litio del mundo se muestran en el mapa de la **Fig. 2**. Los depósitos productores tienen concentraciones promedio de litio que varían de 160 a 1400 ppm y recursos estimados de 0,3 a 6,3 millones de toneladas métricas de litio (Munk y otros, 2016). Los depósitos productores se encuentran en Asia, América del Norte y América del Sur, y se encuentran dentro de los cinturones latitudinales norte y árido a ambos lados del ecuador. Estos depósitos comparten una serie de

características, incluidas las siguientes: (a) un clima árido; (b) cuenca cerrada que contiene un lago salado o salar; (c) subsidencia impulsada tectónicamente; (d) actividad ígnea o geotérmica asociada; (e) rocas generadoras que contienen litio; (f) uno o más acuíferos adecuados para albergar el depósito de salmuera; y (g) tiempo suficiente para concentrar una salmuera. Los aspectos clave del modelo de depósito de litio-salmuera propone la USGS (2017) se muestran en la **Fig. 3**. El depósito de salmuera de litio en Clayton Valley, Nevada, fue un ejemplo bien estudiado que se puede utilizar para destacar algunas de las características clave de este tipo de depósito.

Figura 1. Pegmatitas de Litio.



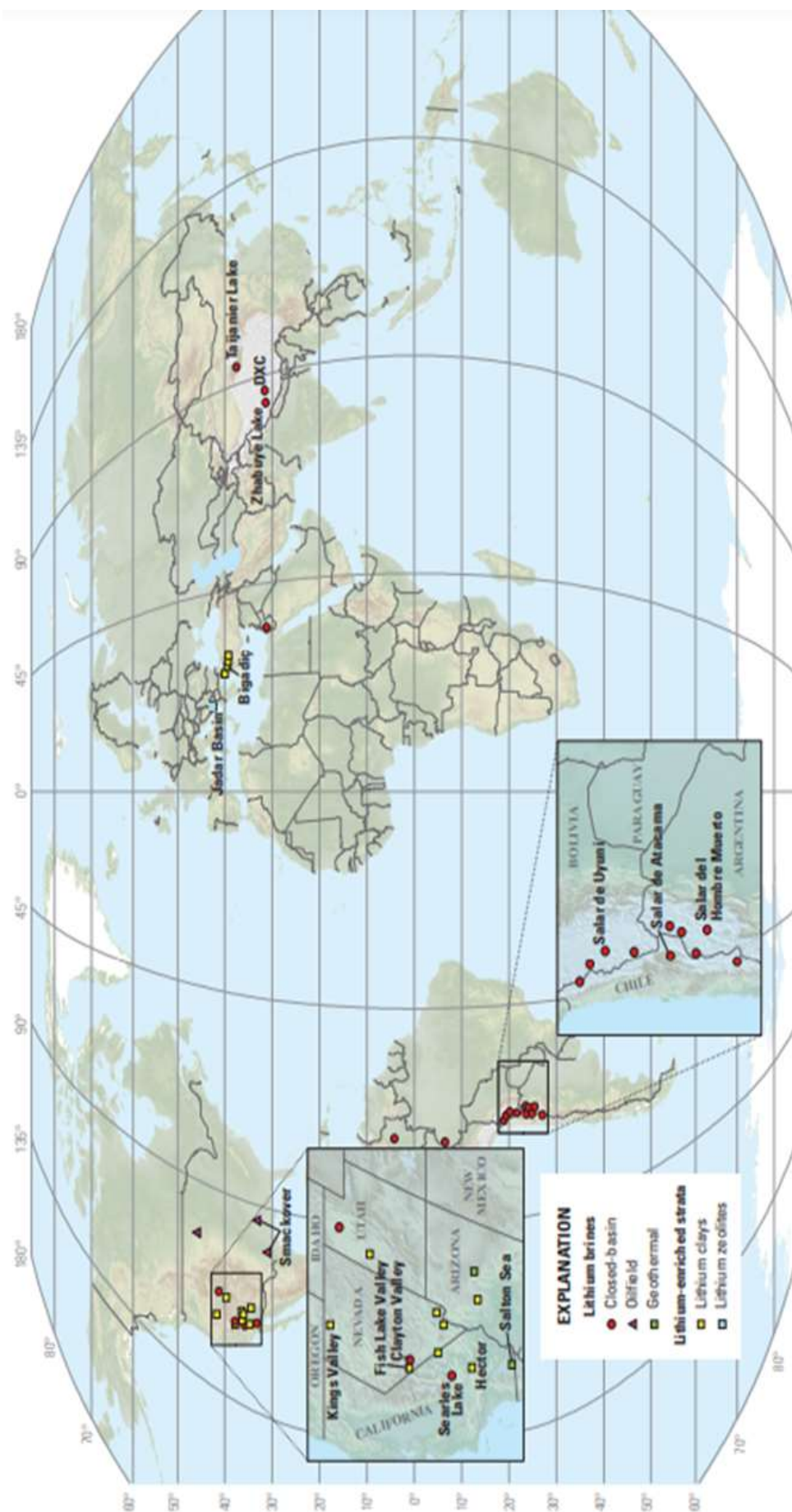
Fuente: Dill, H. G. (2015).

El litio que se produjo a partir de salmuera en Clayton Valley desde la década de 1960. No es una cuenca particularmente notable (tiene una huella relativamente pequeña de unos 100 km² y un recurso total de litio de

alrededor de 0,3 millones de toneladas métricas), pero se entiende mejor que el resto. En los últimos 15 millones de años, Nevada se ha estirado en dirección este-oeste hasta alcanzar aproximadamente el doble de su anchura anterior. Las cuencas fueron una de las muchas consecuencias de este proceso. Las cuencas son regiones relativamente planas donde la superficie anterior de la Tierra se ha hundido a lo largo del tiempo geológico y las depresiones resultantes se han llenado de sedimentos, normalmente de cientos a miles de metros de espesor. La provincia de cuencas y cordilleras es seca. Su aridez se debe en parte a su posición en el extremo norte de los dos cinturones secos de baja latitud de la Tierra y en parte a una doble sombra de lluvia proyectada por dos de las cadenas montañosas más altas de los Estados Unidos continentales (las Montañas Blancas y Sierra Nevada, la última de las cuales alcanza los 4421 m, o 14505 pies). La región llega a ser tan seca que la mayoría de las cuencas están cerradas; es decir, las aguas superficiales (principalmente el deshielo) pueden fluir hacia adentro, pero no hacia afuera. Las aguas que ingresan al lago traen consigo calcio, magnesio, potasio, sodio y elementos menos abundantes, como el litio, disueltos. Estos elementos se han ido acumulando con el tiempo, ya sea en lagos permanentes (como el Gran Lago Salado de Utah) o en lagos efímeros que a veces se secan por completo, dejando un salar (sal o playa) cubierto de minerales evaporíticos. La halita (cloruro de sodio o sal de roca común) ha sido el más conocido de estos minerales. A medida que un lago salado se seca, el litio se comporta de manera algo diferente a otros metales disueltos porque es más soluble. En lugar de cristalizar un mineral evaporítico, el litio permanece en solución y termina en una salmuera residual de sabor amargo. Esta salmuera llega a ser más densa que el agua dulce y se hunde en el subsuelo, donde se acumula en uno o más acuíferos (zonas o capas de roca o sedimento poroso y permeable). En Clayton Valley, la salmuera con mayor concentrado de litio se bombea desde seis acuíferos diferentes que se encuentran todos a unos pocos cientos de metros de la superficie. Se cree que el litio del valle de Clayton proviene de varias fuentes; parte de él fue erosionado de las rocas o sedimentos por la lluvia, el deshielo o las aguas subterráneas, y parte fue traído por aguas hidrotermales que

surgieron de rocas anormalmente calientes debajo de la cuenca como se observa en la **Fig. 2**.

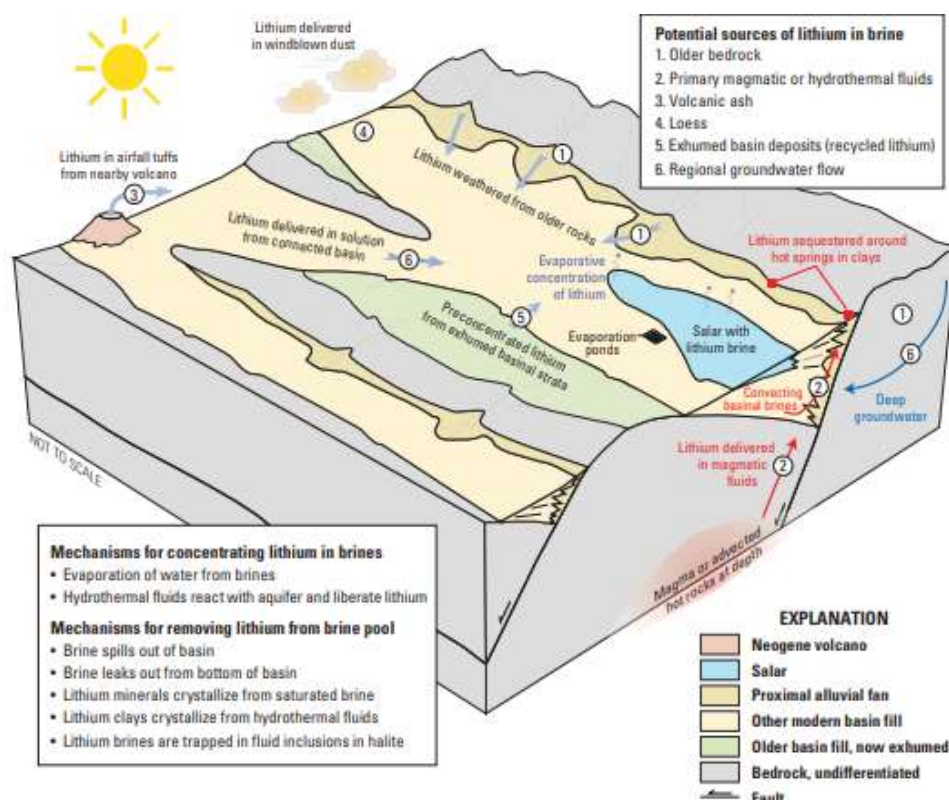
Figura 2. Mapa mundial que muestra la ubicación de depósitos seleccionados de salmuera de litio de cuenca cerrada, salmuera de yacimientos petrolíferos enriquecida con litio, salmuera geotérmica, arcilla de litio y zeolita de litio.



Fuente: Elaborado por USGS (2017) con información de Munk y otros (2016).

En cada estanque de la cadena, la salmuera entra por un extremo, pierde parte de su agua durante las semanas o meses siguientes y se desagua o bombea desde el otro extremo al siguiente estanque. Se utilizan varios estanques para mantener separados los diversos minerales de evaporita que cristalizan en secuencia. Se requieren aproximadamente 2 años para lograr un concentrado que esté enriquecido en litio (hasta 5,000 ppm) y empobrecido en otros elementos más abundantes. Este “agua madre” se bombea desde el último estanque a una planta química para la producción de carbonato de litio e hidróxido de litio. Las mismas condiciones generales que dieron lugar a las salmueras del valle Clayton han creado depósitos aún más grandes en las montañas de los Andes de América del Sur y en el Tíbet, en Asia central. El distrito de litio más importante del mundo es el Salar de Atacama, en el Altiplano de Chile, que es uno de los lugares más secos de la Tierra que cubre una superficie de unos 2100 km², que es aproximadamente dos tercios del tamaño de Rhode Island. Está rodeado de volcanes activos y cortado por fallas activas. El salar se alimenta de una combinación de nieve derretida de las montañas cercanas y fluidos hidrotermales de abajo. Con un promedio de 1,400 ppm de litio, la salmuera es mucho más rica que en Clayton Valley. La reserva total es más de 20 veces mayor, con un estimado de 7.5 millones de toneladas métricas de litio. Otro depósito importante es el Salar de Uyuni en Bolivia, que aún no está en producción. Una dificultad es la abundancia de magnesio disuelto, que obstaculiza la concentración evaporativa del litio al hacer que se precipite prematuramente como impureza en las sales de Mg. El más notable de varios sistemas de salmuera de litio en China está en el lago Zabuye, en el Tíbet. Se trata de la única cuenca cerrada conocida en la que precipita una sal de litio (específicamente, Li_2CO_3 o zabuyelita) como parte de la secuencia mineral evaporítica, y la única cuenca en una compilación global reciente en la que no se ha informado de vulcanismo ni actividad hidrotermal (Munk y otros, 2016).

Figura 3. Modelo conceptual de yacimiento de mineral para salmuera de litio.



Fuente: Elaborado por USGS (2017) con información de Bradley y otros (2013) y Munk y otros (2016).

C) Depósitos de rocas sedimentarias

Para la USGS (2017), las rocas sedimentarias con contenido de Litio son:

- Depósitos de arcillas de Litio

Un pequeño subconjunto de los depósitos de arcilla del mundo está enriquecido con litio. La hectorita, que es un miembro de la familia de minerales arcillosos de la esmectita, parece ser la más extendida, pero Stillings y Morissette (2012) también encontraron arcillas enriquecidas con litio de la familia de la illita, así como mezclas de illita y esmectita. La hectorita, que parece ser la más extendida, es un silicato de sodio, magnesio y litio y contiene aproximadamente medio por ciento de litio. Los yacimientos, prospectos y ocurrencias de arcilla de litio se muestran en la **Fig. 3**.

El recurso de arcilla de litio más importante descubierto ha sido el yacimiento de hectorita Kings Valley, ubicado dentro del complejo de caldera McDermitt, que es un centro volcánico extinto en el norte de Nevada. Este depósito de hectorita tiene un estimado de 48,1 millones de ton., como recursos

indicados y 42,3 millones de Ton., de recursos inferidos con una ley de 0,27 por ciento de litio.

Las arcillas que contienen litio se han extraído en Arizona, California y otras partes de Nevada. Estos depósitos fueron explotados no por su contenido de litio sino más bien por sus propiedades físicas, que los hacen buenos aditivos para, en orden de valor, lodos de perforación, pinturas y cosméticos. Se conoce de otros depósitos fuera de EE. UU. con contenido de Hectorita asociada, como en Turquía.

2.1.3. Principales Minerales de Litio

En el Manuel de Mineralogía de Dana H. (1959) caracteriza los principales minerales de Litio de la siguiente manera:

ESPODUMENA – (Si₂O₆) ALi

Cristalografía: Monoclínico: prismático. Cristales prismáticos, aplastados frecuentemente paralelos al primer pinacoide {100}.

Propiedades físicas. Exfoliación prismática perfecta {110}, con ángulo de 87° y 93°. Generalmente partición bien desarrollada paralela a {100}. **H.**= 6 ½ - 7. **G**= 3,15-3,20. Brillo vítreo. Color blanco, gris, rosa, amarillo, verde. Transparente a lúcido.

La variedad de color lila se denomina *kunzita* y la variedad esmeralda clara, *hiddenita*.

Composición. Silicato de aluminio y litio. Li₂O=8,0%; Al₂O₃= 27,4%; SiO₂= 64,6%. Generalmente tiene una pequeña cantidad de sodio reemplazando al Litio.

Ensayos. Funde a 3 ½, desprendiendo primero pequeñas partículas y fundiendo después en vidrio claro. Llama carmesí (litio), insoluble en los ácidos.

Diagnóstico. Se caracteriza por su exfoliación prismática vertical y fractura pinacoidal. En ángulo formado por una dirección de exfoliación y la de fractura se parecen al ángulo de exfoliación de la tremolita. Es necesario realizar una cuidadosa medición o recurrir a la llama de litio para distinguirlas.

Alternación. La espodumena se altera fácilmente a otras especies volviéndose mate. Los productos de la alteración incluyen albita, eucryptita ($(\text{SiO}_4)\text{LiAl}$), moscovita y microclina.

Yacimiento. La espodumena es una especie relativamente rara, pero se encuentra en ciertas ocasiones en cristales muy grandes en las vetas de pegmatitas. En Goshen, Chesterfield, Huntington y Sterling, Massachusetts; Branchville, Connecticut; Newry, Maine; Dixon, Nuevo Mexico; Etta Mine, Black Hills, Dakota del Sur, en cristales que llegan a medir hasta 12 metros de longitud y que pesan varias toneladas. La hiddenita aparece junto al berilo esmeralda en Stony Point, Alexandre Country, Carolina del Norte. La kunzita se halla con el berilo rosa en Pala, San Diego Country, California, y en diversos lugares en Madagascar.

Empleo. Como fuente de litio. El empleo más importante del litio es adicionarlo a las grasas para ayudarlas a conservar sus propiedades lubricantes dentro de un amplio rango de temperaturas. Se utiliza en cerámica, baterías de acumuladores y como flujo para soldar. Las variedades hiddenita y kunzita proporcionan gemas muy bonitas, aunque sus yacimientos son muy raros.

Etimología. Espodumena procede de una palabra griega que significa *ceniza coloreada*. *Hiddenita*, en honor de Mr. W. E. Hidden; *Kunzita* en honor del doctor G. F. Kunz.

LEPIDOLITA – $(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})_2\text{K}_2\text{Li}_3\text{Al}_3(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$

Mica de Litio

Cristalografía: Monoclínico: prismático. Los cristales generalmente en placas pequeñas o primas de aspecto hexagonal. Comúnmente en agregados de escamas o grano fino y basto.

Propiedades físicas. Exfoliación basal perfecta {001}. **H.**= 2 ½ - 4. **G**= 2,8-3,0. Brillo perlado. Color rosa y lila a blanco grisáceo. Translúcido.

Composición. Fluosilicato de potasio, litio y aluminio.

Ensayos. Funde a 2, dando una llama carmesí (litio). Insoluble en los ácidos. Agua ácida en tubo cerrado.

Diagnóstico. Se caracteriza principalmente por la exfoliación micácea y por el color lila a rosa. La moscovita puede ser rosa, o la lepidolita blanca, y por lo tanto, será necesario hacer el ensayo de la llama para distinguirlas.

Yacimiento. La lepidolita es un mineral relativamente raro, se halla en las vetas de pegmatitas generalmente asociada a otros minerales que contienen litio. Los yacimientos importantes en el extranjero son los Montes Urales, U.R.S.S.; isla de Elba, Rozna, Moravia y Madagascar. En los Estados Unidos se encuentra en el oeste de Maine, Hebron, Auburn, Norway, París, Rumford, cerca de Middletown, Connecticut, Pala, San Diego Country, California, Black Hills, Dakota del Sur.

Empleo. Una mena de litio. Se emplea en la fabricación de vidrios resistentes al calor.

Etimología. Derivado de una palabra griega que significa *escama*.

PETALITA – (AlSi₄O₁₀) Li

Cristalografía: Monoclínica domática. Cristales raros aplastados según {010} o alargados según {100}. Generalmente compacta o en masas exfoliables.

Propiedades físicas. Exfoliación perfecta según {001} y buena según {201}, fractura concoidal imperfecta. Frágil. **H.**= 6 - 6 ½. **G**= 2,4. Brillo vítreo, nacarado en {001}. Incoloro, blanco, gris. Transparente a translúcida.

Composición. Silicato de aluminio y litio. (AlSi₄O₁₀) Li. LiO= 4,9; Al₂O₃ = 16,7; SiO₂ = 78,4%.

Ensayos. Funde a 5, dando una llama roja del litio. Calentada ligeramente emite luz azul fosforescente. Insoluble en los ácidos.

Diagnóstico. Caracterizada por su hábito tabular. Se distingue de la espodumena por la exfoliación y menor peso específico.

Yacimiento. En pegmatitas asociada a cuarzo y minerales litíferos como la espodumena, turmalina y lepidolita. Hasta mediados del siglo XX era considerada como mineral bastante raro, encontrado en Uto, Suecia; Perú, Maine y con escapolita en Bollon, Massachusetts. Recientemente

descubrimientos de petalita en Rodesia del Sur y en el África Sudoccidental la han convertido en un mineral abundante: en estas localidades es beneficiado en grandes cantidades, asociado a lepidolita y eucryptita.

Empleo. Mena de litio importante (véase espodumena)

Etimología. Del griego *hoja*, aludiendo a su exfoliación.

2.1.4 Proyecto de litio Falchani

En el último Informe Técnico de la Evaluación Económica Preliminar del Proyecto de Litio en Falchani, que tiene libre acceso por la empresa American Lithium se tiene la siguiente información:

Ubicación: El proyecto está situado en el sur este de Perú en la cordillera de los Andes de la meseta de Macusani, ubicada en la Provincia de Carabaya, Región de Puno. El depósito Falchani se encuentra dentro de las licencias de Macusani Yellowcake S.A.C.

El Proyecto Falchani se encuentra aproximadamente a 650km al sur este de Lima y a unos 220km por carretera desde Juliaca en el sur. La ciudad de Macusani se encuentra a unos 25km al sur este de la meseta de Macusani. Las concesiones mineras de Macusani Yellowcake SAC cubre un área total de 93000 hectáreas.

Geología y Mineralización: Según la interpretación geológica, en el área del Proyecto las tobas del Terciario tardío, las ignimbritas y los sedimentos asociados se conservan en un graben con tendencia NW-SE. Gran parte de la cubierta del Terciario Temprano y el Mesozoico fue erosionada antes de la deposición de los piroclásticos, por lo que se depositaron en parte directamente sobre las rocas del Paleozoico, incluidos los intrusivos (granitos hercinianos) y extrusivos (volcánicos Mitu) del Paleozoico tardío.

En la mineralización del litio de Falchani, SGS Canadá ha realizado estudios mineralógicos y petrológicos limitados para el Proyecto Falchani, por lo cual, SGS cree que la mineralización de litio es primaria, relacionada directamente con la química del magma original, aunque no ha descartado la alteración y el enriquecimiento por aguas subterráneas o fluidos hidrotermales en el ínterin. Además, el trabajo de SGS Canadá ha identificado solo minerales de

litio raros y cree que la mayor parte del litio extraíble reside en vidrio volcánico de aluminosilicato.

Estimación de recursos minerales

El modelo geológico a partir del cual se informan los recursos de litio es un modelo de bloques 3D desarrollado utilizando el Sistema Geodésico Mundial (WGS) 1984 UTM Zona 19S y está en unidades métricas. El modelo geológico está dividido en siete zonas litológicas de las cuales existen cuatro zonas mineralizadas. Las zonas litológicas son, de arriba a abajo: sobrecarga, riolita superior, brecha superior mineralizada (UBX), toba rica en litio mineralizada (LRT), brecha inferior mineralizada (LBX), unidad de basamento de intrusión félsica gruesa mineralizada (CFI) e intrusión subvolcánica de riolita. Las zonas litológicas están divididas a su vez en nueve (9) bloques de fallas que están divididos por dos (2) fallas normales de alto ángulo con dirección norte-sur (falla del valle y falla este) y seis (6) fallas normales con dirección noroeste y suroeste (NW1 a NW6). Se estimaron los grados de litio, cesio, potasio y rubidio de las perforaciones exploratorias en los bloques utilizando un algoritmo de distancia inversa. Se utilizaron semivariogramas como guía en el proceso de estimación y clasificación de las estimaciones de recursos minerales en categorías de garantía.

Los recursos minerales de las tres zonas mineralizadas superiores (UBX, LRT y LBX) se clasifican por distancia desde la muestra de perforación válida más cercana hasta una distancia máxima de 250 m para inferidos, 160 m indicados y 80 m medidos. Los recursos minerales para el CFI están dentro de los 160 m para inferidos, 80 m indicados y 40 m medidos.

Las estimaciones de recursos minerales de litio se presentan en la **Tabla N°4** en unidades métricas. Las estimaciones de recursos están contenidas dentro de una cubierta de pozo económica con una pendiente de pozo constante de 45° hasta una profundidad vertical máxima de 300 m por debajo de la superficie. Los recursos de litio se presentan para un rango de leyes de corte hasta un máximo de 5000 ppm de litio. Las estimaciones de recursos de litio

del caso base se resaltan en negrita en la **Tabla 1.4**. Todos los recursos de litio en la propiedad Falchani son explotables a cielo abierto a una tasa de extracción de 0,4 BCM/tonelada métrica con la ley de corte del caso base de 600 ppm de litio. La fecha efectiva de la estimación de recursos de litio es el 31 de octubre de 2023.

Tabla N°4. Fases de producción por etapas.

Aumento de la Producción	Año 1	Año 2	Año 3 a 7	Año 8	Año 9 a 12	Año 13	Año 14 a 32
Alimento a Planta M t/año	0.75	1	1.5	2.25	3	4.5	6

Fuente: DRA PACIFIC (2024)

2.1.5 Usos de Litio

La demanda del litio se inició en la segunda guerra mundial donde se usaba hidróxido de litio en la adsorción del anhídrido carbónico de los submarinos, así como hidruro de litio como fuente para inflar globos de antenas de radios para salvavidas. La ampliación de la demanda se desarrolló el bromuro de litio que se usaban en acondicionadores de aire por absorción, además que el Litio metálico se convirtió en intermediario en la síntesis de productos farmacéuticos. A principios de la década del 70, Kaiser Aluminium & Chemical Corp. comenzó a agregar en las celdas de fundición de Al, carbonato de litio, lográndose reducir los consumos de energía. A mediados de los 70, el litio empezó a usarse metálico como ánodo en las baterías primarias por sus propiedades electroquímicas. En la década del 80, la industria del Al desplaza a la industria de vidrios y cerámicas.

Los motores que sustentan la demanda de litio se podrían clasificar en: En primer lugar, el segmento de baterías de ion–litio, largamente utilizado en la producción de automóviles eléctricos, productos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía. En segundo lugar, están los de usos antiguos de litio, incluyendo vidrios y cerámicas, grasas y lubricantes, sistemas de aire acondicionado e insumos farmacéuticos, etc. (**Tabla N°5**).

Tabla N°5. Usos de Litio

BATERÍAS RECARGABLES	USOS TRADICIONALES
Electro - movilidad	Vidrio y cerámicas
Vehículos livianos y pesados, e-bikes, scooters	El litio hace que estos productos quieran una serie de propiedades, tales como: menor expansión térmica, menor temperatura y mayor
Artículos electrónicos	Grasas y lubricantes
Tablets, computadoras y teléfonos, herramientas	Permite usarlos a temperaturas y condiciones variables
Almacenamiento energético	Otros
Combinando baterías con sistemas de machine learning, se puede conservar electricidad para uso	Tratamiento de aire, productos farmacéuticos, plásticos y polímeros, entre otros.

Fuente: Cochilco

Spellman, F. (2024) realiza una descripción de la siguiente manera:

A) Purificación de aire

Una concentración de dióxido de carbono superior a 8% causaría la muerte de una persona. Un buen ejemplo que requiere su eliminación sucede en el espacio confinado de una nave espacial. Momento en que interviene el litio a través de procesos químicos; en realidad, es donde el hidróxido de litio es útil y necesario. Un ejemplo conocido ocurrió en la misión Apolo 13, donde Haise y Swigert utilizaron plástico y cinta adhesiva para construir un instrumento adaptador para el purificador que funcionaba con depósitos de hidróxido de Litio disponibles.

B) Dispositivos electrónicos

La enorme ventaja y beneficio del uso del litio en dispositivos electrónicos han sido su excelente conductividad eléctrica y su muy baja densidad que le permite flotar en el agua. Estos atributos hacen del litio un componente ideal, por ejemplo, para la fabricación de baterías.

C) Dispositivos ópticos

El óxido de litio, liberado a partir de carbonato de litio o espodumeno, se utiliza en la composición de vidrio de productos ópticos para espectroscopia. El litio se utiliza en anteojos especialmente fabricados para rangos de

infrarrojos, ultravioleta y ultravioleta al vacío. Así mismo, se utiliza en vidrio para envases, vidrio plano, vidrio farmacéutico, vidrio especial y productos de vidrio.

D) Fluoruro de Litio (LiF)

El fluoruro de litio ha sido utilizado para ventanas, prismas, ópticas especializadas y lentes en los rangos de UV (ultravioleta) especiales al vacío, UV, visible e infrarrojo con un rango de transmisión de 0,11 a 7 μm . Debido a su índice de refracción, el LiF se puede encontrar en aplicaciones de radiación electromagnética. También ha sido utilizado ocasionalmente en lentes focales para enfocar haces de protones de mayor energía. El fluoruro de litio también se puede encontrar en teléfonos móviles como oscilador de cristal que genera señales con una precisión impecable. El fluoruro de litio también ha sido utilizado para placas monocromadoras de rayos X.

E) Cristalería

El litio que se utiliza en la cerámica y el vidrio ha desempeñado un papel importante en la vida cotidiana durante décadas. La cristalería que se utiliza para calentar la comida en el microondas se fabrica con litio, lo que mejora sus propiedades térmicas que incluyen la capacidad del litio para reducir la expansión térmica. El litio utilizado en la vitrocerámica garantiza que el molde se mantenga unido; es decir, se mantenga en su lugar y esto evita la expansión porque no hay resistencia térmica.

La adición de litio a la cristalería de cerámica aumenta la resistencia del cuerpo cerámico. Esto conduce a una mayor durabilidad.

El óxido de litio (Li_2O) se utiliza para reducir el punto de fusión y la viscosidad de los materiales necesarios para fabricar vidrios y cerámicas de alta resistencia.

Al moldear sin adicionar Li, los usuarios han descubierto que el producto final que deseaban se ve influenciado en los colores de la cerámica base.

¿Alguna vez se ha preguntado por qué las ventanas no se marchitan bajo presión? En la práctica, las ventanas normales tienen doble acristalamiento, con dos paneles de vidrio separados por un espacio de aire. El espacio de aire suele estar lleno de gas argón, que proporciona excelentes propiedades de aislamiento y de insonorización. Una fina capa de litio añadida al vidrio hace que la casa sea cálida en invierno y más fresca en verano. El litio garantiza que la cerámica y la cristalería que se utilizan hoy en día se erosionen lentamente porque reduce las tasas de corrosión. También funciona como un agente purificador que evita que se formen óxidos en la superficie.

F) Metalurgia

El uso del litio en la metalurgia se puede requerir en dos funciones, en primer lugar, la metalurgia utilizada en el uso industrial. En ciertos procesos metalúrgicos, el litio activo se utiliza en un uso muy importante como elemento depurador de las impurezas no metálicas, impurezas como el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, el carbono y otras. En otro proceso metalúrgico, el litio se utiliza para mejorar el comportamiento de fusión de los óxidos de aluminio. En segundo lugar, la metalurgia y otros procesos se utilizan para extraer litio de los recursos.

G) Estudios de extracción de litio

La Oficina Federal de Minas ha determinado que existen varios enfoques para extraer litio de las arcillas. El procedimiento de extracción que se debe utilizar para extraer litio depende de la materia prima específica que se esté considerando. Se han informado docenas de métodos de extracción de litio y muchos de ellos se han probado en laboratorios; tenga en cuenta que la mayoría de los procesos se han establecido para materias primas de pegmatita y pueden no ser efectivos para extraer litio de la materia prima de arcilla. Estudios anteriores de la Oficina de Minas se centraron en la calcinación con cal y yeso y la calcinación con cloruro para la extracción de litio de la espodumena y la amblygonita. Las técnicas elegidas para extraer litio de las arcillas fueron (1) desagregación en agua; (2) tratamiento hidrotérmico; (3) lixiviación ácida; (4) lixiviación ácida con agua de cocción;

(5) lixiviación alcalina con agua de cocción; (6) lixiviación con sulfato con agua de cocción; (7) lixiviación con cloruro con agua de cocción; y (8) lixiviación con agua de cocción con reactivos múltiples.

H) Aleaciones

Otra aplicación común del litio es su uso como aleación con otros elementos para mejorar sus propiedades mecánicas y químicas. Cuando el litio se alea con otros elementos como el aluminio y el magnesio, la resistencia de estos elementos aumenta exponencialmente. Además, el litio reduce el peso de varios elementos aleados, pero nuevamente, al mismo tiempo, aumenta su resistencia. Un par de ejemplos en los que el litio se alea con magnesio y aluminio son las aleaciones de litio y magnesio que se utilizan para fabricar blindajes y las aleaciones de litio y aluminio que se utilizan para fabricar piezas de aviones y trenes de alta velocidad, y también en cuadros de bicicletas.

I) Grasa lubricante

Jabón a base de litio

- Las grasas lubricantes elaboradas con contenido de litio son capaces de soportar altas temperaturas, minimizar la fricción y, por lo tanto, se utilizan en varios motores de aeronaves; su uso más intenso como tal se produjo durante la Segunda Guerra Mundial. Estas grasas se preparan utilizando jabones a base de litio (estearato de litio) porque tienen la capacidad de espesar los aceites. En el proceso, los jabones a base de litio se elaboran calentando la base fuerte hidróxido de litio (LiOH), con una grasa, y el resultado es un producto con un punto de fusión más alto en comparación con otros jabones alcalinos.

Estearato de litio

- Los jabones a base de litio también se conocen como estearato de litio. Entonces, la pregunta es: ¿Qué es el estearato de litio? Son las sales metálicas de ácidos grasos (también llamados jabones) que se utilizan en varias industrias y por diferentes razones.

Los jabones pueden tener diferentes propiedades según el tipo de ácido graso, la longitud de la cadena de carbono y el álcali utilizado. Los jabones grasos con sus cadenas más largas son insolubles. Para desarrollar un jabón duro, se utiliza hidróxido de sodio (también conocido como cáustico) como álcali. El jabón blando resulta cuando se utiliza hidróxido de potasio como álcali.

Debido a que el litio es ligero, blando y altamente reactivo, se puede utilizar en varias aleaciones para formar compuestos tanto inorgánicos como orgánicos, como hidruro de litio, carbonato de litio, hidróxido de litio y también uno de esos compuestos es el estearato de litio.

Una grasa lubricante de uso generalizado que proporciona una alta resistencia al agua es la que de manera práctica usa el estearato de litio y que así mismo tiene una alta demanda en la industria cosmética como estabilizador. Debido a sus propiedades, el estearato de litio tiene aplicaciones como inhibidor de corrosión en el petróleo. Las industrias automotrices, de maquinaria pesada y aeroespacial utilizan estearato de litio porque se puede aplicar tanto a altas como a bajas temperaturas.

El estearato de litio se utiliza en muchas aplicaciones diferentes, desde actuar como un gran sellador hasta usarse como agente antioxidante y anticorrosión. También tiene excelentes aplicaciones a alta temperatura. Los aceites naturales y sintéticos utilizan estearato de litio como agente espesante.

J) Uso de litio en la medicina

Para el-Mallakn (1990) citado por Spellman (2024), durante más de 70 años, el litio se ha utilizado clínicamente para el tratamiento del trastorno bipolar y otros trastornos psiquiátricos, como la enfermedad esquizoafectivo y bipolar. Cuando el litio se complementa con antidepresivos, es útil en la depresión unipolar resistente al tratamiento. El litio también se utiliza de manera eficaz para tratar las cefaleas en racimos y para mejorar la neutropenia inducida por quimioterapia (es decir, el recuento bajo de glóbulos blancos). Se han

informado y revisado otros usos del litio en psiquiatría y medicina. Sin embargo, el uso del litio puede verse limitado por los efectos secundarios tóxicos agudos y crónicos. El efecto secundario tiene que ver con la disfunción del sistema nervioso central (SNC): el grado de toxicidad es paralelo al grado de disfunción del SNC. La experiencia ha demostrado que las manifestaciones tóxicas crónicas afectan los sistemas cardíaco, renal y endocrino. La exposición in feto puede causar una rara anomalía del desarrollo; puede ser teratogénica.

2.1.6 Baterías de litio

Las baterías de iones de litio son diferentes a las baterías estándar de plomo-ácido. Una de las principales diferencias entre los tipos de baterías son sus ciclos de descarga profunda. Uno de los usos del litio más importantes y valiosos es como componente de las baterías de iones de litio recargables de alta densidad energética. Dado el interés mundial de reducir la huella de dióxido de carbono y el aumento del alto costo del combustible de hidrocarburos y su suministro reducido, el litio se ha vuelto más importante en las baterías grandes para alimentar vehículos totalmente eléctricos e híbridos. Se requieren menos de 5 kg de equipos de litio (menos de 20 kg de carbonato de litio) para soportar un viaje de 40 millas en un vehículo eléctrico (VE) antes de requerir recarga. Como se puede imaginar, esto ha creado una gran y creciente demanda de litio. Las estimaciones de la demanda futura de litio varían, en función de numerosas variables, incluida la disponibilidad de litio. Otras variables incluyen el potencial de reciclaje (**Figura 4**), la aceptación generalizada de los VE o la posibilidad de incentivos para la conversión a motores alimentados con litio.

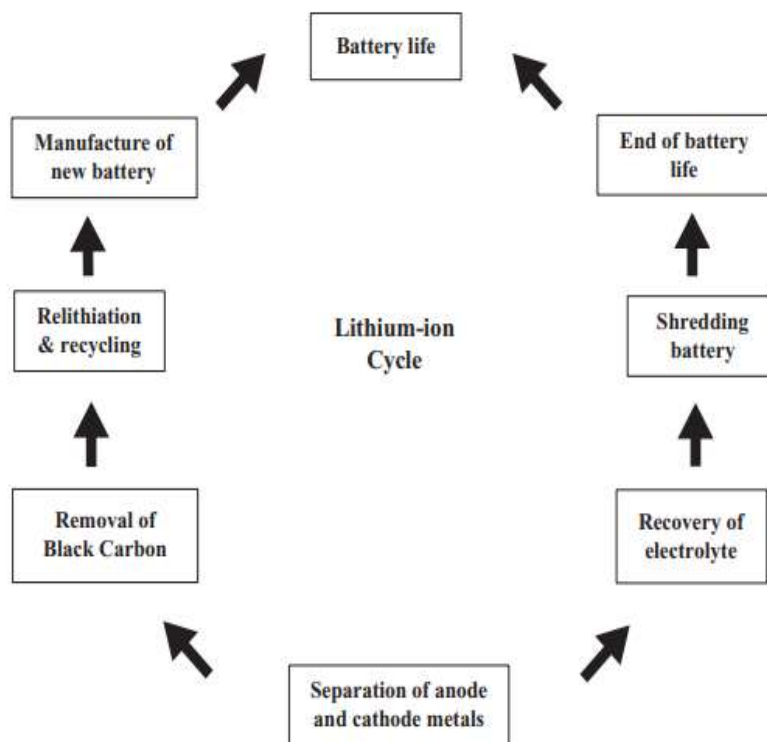
En la actualidad ha sido bastante difundido el utilizar baterías de iones de litio para alimentar vehículos (VE), se espera que el reciclaje de baterías aumente porque los sistemas de reciclaje de baterías de vehículos se pueden utilizar para producir nuevas baterías de iones de litio.

Reciclaje

Cuando las baterías de iones de litio de los vehículos llegan al final de su vida útil, deben reciclarse (y se están reciclando). En 2009, se estima que

3.700 toneladas de baterías de desecho que contienen litio se pusieron a disposición del mercado mundial. Spellman, F. (2024). La manipulación de las baterías de desecho es muy delicada, es importante una gobernanza con conocimiento y legislación que se fuerte y clara ante los riesgos potenciales para las personas, la propiedad y el medio ambiente.

Figura 4. Ciclo de los iones de litio.



Fuente: Spellman, F. (2024)

2.1.7 Tobas volcánicas

En el artículo “Tuff” de Geology Science (2023) se define a las tobas volcánicas como un tipo de roca sedimentaria que se conformó a raíz de la consolidación de cenizas volcánicas y otros desechos volcánicos. Es un tipo de roca que se produjo de erupciones volcánicas explosivas, momentos en los cuales se arrojó a la atmósfera una combinación de cenizas incandescentes, porciones de roca y gases. A medida que estos materiales se apoyan y acumulan, casualmente pueden compactarse y cementarse para originar roca de toba.

2.1.8 Procesos para la extracción de litio de minerales de litio

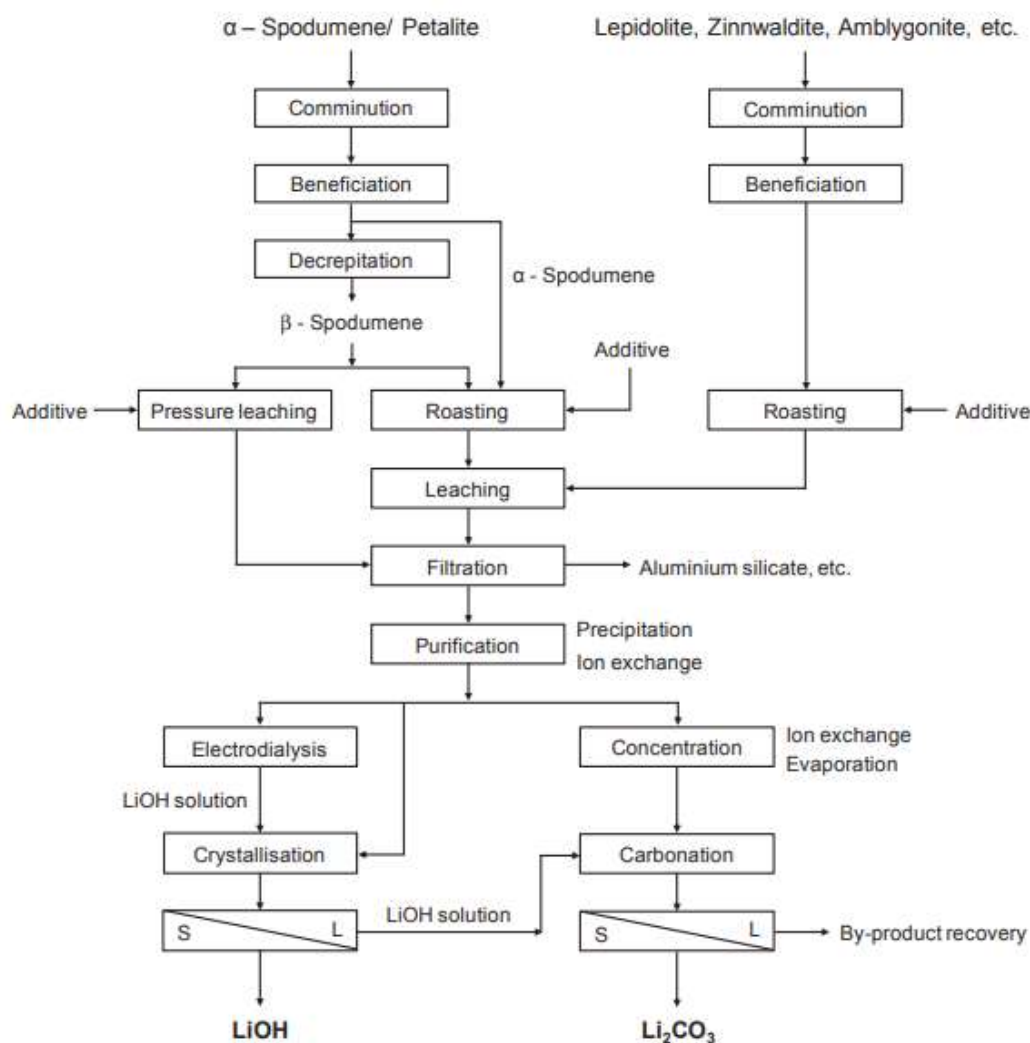
Para Tam Tran y Van T. Luong (2015) los procesos de extracción de litio se pueden esquematizar según el mineral de litio en el que se presenta, lo que implica inicialmente la trituración de las materias primas, seguida de la beneficiación mediante técnicas como flotación, separación magnética, clasificación óptica o separación en medios pesados para producir concentrados que contienen entre un 4 y un 6 % de Li_2O . Estos concentrados pueden luego ser alimentados a la tostación y lixiviación para extraer el litio en solución. Los hidróxidos metálicos, las sales o los ácidos se añaden a los concentrados durante el tratamiento térmico para producir compuestos lixiviables de sulfato, carbonato o cloruro de litio. Luego se lleva a cabo la purificación principalmente por precipitación para eliminar las principales impurezas como Ca, Mg, Al y Fe, seguida de la concentración de los valores de Li mediante intercambio iónico o principalmente evaporación. Finalmente, se lleva a cabo la cristalización, carbonatación o electrodíálisis para producir compuestos de litio (Li_2CO_3 , LiCl , LiOH) de grado químico o de batería o litio metálico a partir de estos precursores. En la **Figura 5** se muestra un diagrama de flujo general para el procesamiento de minerales de litio.

2.1.8.1 Procesamiento de la Espodumena

La espodumena es, entre los minerales de contenido de litio, el mineral más común que se ha extraído y procesado comercialmente para producir compuestos de litio a nivel mundo. Los procesos de refinación de minerales de espodumeno para obtener productos químicos de litio se resumen en la **Tabla N°6**. Las operaciones más grandes que fabrican productos de litio a partir de espodumeno (concentrados/compuestos refinados) actualmente (2015) son propiedad de Talison Lithium Ltd (Australia) y Sichuan Tianqi Lithium Industries Inc. (China). En Australia Occidental se realizaron variados procesos metalúrgicos como: flotación y separación magnética para producir concentrados de litio. Por otro lado, hasta antes de diciembre de 2013, también en Australia se producían concentrados de espodumeno como materia prima de una planta de producción de carbonato de litio en

Asia. En esta planta, a través de decrepitación de pasar de alfa a beta espodumena se obtenía una calcina que luego de ser tostada con ácido sulfúrico (a 250 °C) se realizaba una lixiviación con agua a 90 °C para extraer el litio en solución. Las impurezas, se eliminan como hidróxidos a pH 12 agregando NaOH. El licor de lixiviación purificado pasaba por una carbonatación y se obtenía precipitado de carbonato de litio. Tanto Li_2CO_3 de grado batería (99,5 %) como Na_2SO_4 como subproducto se producen a partir de este proceso. Este proceso de tostado con ácido también se utilizó variadas plantas comerciales.

Figura 5. Diagrama de flujo general para la producción de compuestos de litio a partir de fuentes minerales.



Fuente: Elaborado por Tam Tran, Van T. Luong. (2015)

Tabla N°6. Perfiles experimentales y resultados de varios estudios sobre el procesamiento de la espodumena

Decrepitación (°C)	Tostación		Lixiviación/Presión de Lixiviación		Max. Recup. Li (%)	Producto final - Pureza
	Aditivo	Temp. (°C)	Extractante	Temp. (°C)		
1050-1090	Conc. H ₂ SO ₄ H ₂ O + NaOH/Na ₂ SiO ₃ /2Na ₂ O.B ₂ O ₃ /	200-250	H ₂ O	90	>90	Li ₂ CO ₃ , LiOH.H ₂ O >99.5%
900-1000	Na ₂ S	70-130	(NH ₄) ₂ CO ₃ solución	0-40	93	Li ₂ CO ₃ -> 98%
~ 1038	(NH ₄) ₂ SO ₄ /NH ₄ HSO ₄	150-370	NH ₄ OH	No declarado	No declarado	No incluido
~ 1100	NaCOOH + Na ₂ CO ₃	~ 290	H ₂ O	No declarado	98-100	No incluido
1040	Cl ₂ + CO	1000	No incluido		~ 90	No incluido
900-1100	Limonita + CaCl ₂ + arena	1100-1200	No incluido		90-95	LiCl
1050	No incluido		H ₂ O + Na ₂ CO ₃	225	~ 96	Li ₂ CO ₃ -99.6%
1100	No incluido		Solución HF 7%	75	>90	Li ₂ CO ₃ -98.3%
1100-1150	No incluido		Leche de lima	100-205	>90	Li ₂ CO ₃ -97.8%
1010-1065	No incluido		H ₂ O + NaOH/ Na ₂ CO ₃ + CaO/ Ca(OH) ₂	100-200	No declarado	Li ₂ CO ₃
No incluido	Cal	1030-1040	H ₂ O	No declarado	No declarado	LiOH, LiOH.H ₂ O
	Caliza + yeso	~ 1100	Solución de CaCl ₂	No declarado	85-90	LiCl
	Muriato de potasa (KCl) + silvinita (KCl.NaCl)	1000	Solución de HCl	85	100	Li ₂ CO ₃ -97.5%
	Conc. H ₂ SO ₄	250-400	H ₂ O	95	96	No incluido
	Caliza	1000-1230	H ₂ O	100-205	~ 80	No incluido
	Taquiuhidrita (CaMg ₂ Cl ₆ .12H ₂ O)	~ 1150	H ₂ O	~ 100	87	No incluido

Fuente: Elaborado por Tam Tran, Van T. Luong. (2015)

Para poder obtener Li₂CO₃ y LiOH.H₂O de alta pureza se ha reportado un proceso de calcinación ácida utilizando espodumena, que incluye un módulo de electrodialisis para obtener LiOH en solución a partir de una solución de Li₂SO₄ purificada obtenida después de eliminar las impurezas por precipitación e intercambio iónico. La solución de LiOH obtenida se calienta para concentrar los valores de Li y finalmente se lleva a cabo una etapa de cristalización para producir LiOH.H₂O.

Se ha probado también un esquema de lixiviación a presión de β-espodumena utilizando carbonato de sodio que podría producir Li₂CO₃ de grado de batería (pureza del 99,5%). Por otro lado, la formación de compuestos de litio gaseosos durante el tratamiento térmico de la espodumena en presencia de aditivos se ha descrito en varias patentes.

Tam Tran y Van T. Luong. (2015) revisaron los estudios de la extracción de litio de la espodumena utilizando ácido. Así, algunos estudios utilizaron soluciones ácidas de HF y H₂SO₄ con recuperaciones superiores a 90%, con

la diferencia que con H_2SO_4 se realizó los estudios a temperaturas superiores de 200°C y presiones superiores a 50 psi.

2.1.8.2 Procesamiento de Lepidolita

Se ha investigado la extracción de litio de la lepidolita, aunque los estudios publicados para esta especie mineral no son tan intensivos como los de la espodumena. Los concentrados de lepidolita, usualmente, se obtienen primero a través de una preconcentración antes de realizarse el procesamiento químico. A diferencia de la espodumena, el pretratamiento de la lepidolita mediante decrepitación es innecesario en la mayoría de las rutas y se prefiere la tostación en un solo paso de la lepidolita y los aditivos a alta temperatura. Los procesos para extraer litio de la lepidolita y producir compuestos de litio de alto grado se resumen y se presentan en la **Tabla N°7**.

Tabla N°7. Perfiles experimentales y resultados de varios estudios sobre el procesamiento de lepidolita

Tostación		Lixiviación/Presión de Lixiviación		Max. Recup.	Producto final -
Aditivo	Temp. ($^\circ\text{C}$)	Extractante	Temp. ($^\circ\text{C}$)	Li (%)	Pureza
Vapor H_2O	860	Leche de lima	150	~ 99	Li_2CO_3 -99.9%
$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCl}_2$	880	H_2O	Ambiente	~ 95	Li_2CO_3 ->99.5%
Conc. H_2SO_4	120-340	H_2O	No declarado	~ 94	Li_2CO_3
Solución al 72% H_2SO_4	165	H_2O	No declarado	~ 92	Li_2CO_3
Caliza	900	H_2O	No declarado	~ 80	Li_2CO_3
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CaO}$	850	H_2O	Ambiente	~ 93	No incluido
$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{CaO}$	850	H_2O	Ambiente	~ 92	
SO_3	800-900	H_2O	No declarado	~ 90	
CaCl_2	~ 843	H_2O	No declarado	88	
Na_2SO_4	1000	H_2O	85	~ 90	
$\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$	880	H_2O	60	~ 93	
Aire	1000	Resina + H_2O	100	87.5	
Gas HCl	910	No incluido		95	

Fuente: Elaborado por Tam Tran, Van T. Luong. (2015)

El tratamiento térmico de lepidolita y Na_2SO_4 como aditivo principal con o sin otros ingredientes como K_2SO_4 , CaO y CaCl_2 han resultado en obtención de Litio. En comparación con la espodumena, a presencia de potasio como uno de los elementos constituyentes resultan en la formación de LiKSO_4 en

productos tostados, lo que requiere una lixiviación a alta temperatura para lograr recuperaciones máximas de litio. Este compuesto también se encontró durante el tratamiento con sulfato de la litionita.

Se tiene un proceso completo recomendado para la producción de Li_2CO_3 de alta pureza a partir de lepidolita con contenido aproximado de 2,0% de Li. Después de tostar la lepidolita con una combinación de Na_2SO_4 y CaCl_2 a 880°C , la calcina obtenida se lixivió con agua a temperatura ambiente para liberar Li en el licor de lixiviación. Se obtuvo una extracción de litio mayor a 94% y una solución de Li de $\sim 8,5$ g/L. Durante la eliminación de impurezas, el calcio se retiró a través de carbonatación, mientras que el Mg, el Al y otras impurezas se descartaron posteriormente como hidróxidos utilizando soda cáustica. Después de la filtración, el filtrado se enfrió a 5°C para cristalizar $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y NaCl , lo que dio como resultado la reciprocidad de $\sim 92\%$ de sulfato y $\sim 4\%$ de cloruro. El licor purificado se calentó a más de 95°C para obtener 20-24 g/L de solución que contenía Li, de la que se precipitó Li_2CO_3 añadiendo Na_2CO_3 , su lavado con agua, seguido del secado a 120°C , produjo Li_2CO_3 con una pureza $>99,5\%$ como producto final.

El pretratamiento de la lepidolita para generar un producto con Li más reactivo también se aplicó en varios estudios. En 2012, Yan y colaboradores examinaron un nuevo esquema para producir Li_2CO_3 de alta pureza a partir de un mineral de lepidolita chino que contenía 1,4 % de litio. El mineral se tostó primero a 860°C en presencia de vapor de agua para desfluorar la lepidolita.

Se encontraron fases de silicato de aluminio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) y leucita (KAlSi_2O_6) en el producto desfluorado. La lixiviación a presión de dicho producto con lechada de cal a 150°C extrajo el 98,9 % del Li contenido en el mineral original. El calcio en el licor de lixiviación se eliminó añadiendo Na_2CO_3 , y la solución obtenida después de la filtración se evaporó para cristalizar $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ acompañado de Li_2CO_3 . Los sólidos se recuperaron mediante filtración y se redisolvieron en agua de la que se separó el Li_2CO_3 insoluble. Luego, se inyectó CO_2 en la solución para formar LiHCO_3 soluble y otras impurezas precipitadas. Luego se realizó la filtración y el filtrado se calentó a 90°C para liberar CO_2 para la reprecipitación de Li. En el producto

desfluorado se encontraron fases de silicato de aluminio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) y leucita (KAlSi_2O_6). La lixiviación a presión de dicho producto con lechada de cal a 150°C extrajo el 98,9% de Li contenido en el mineral original. El calcio en el licor de lixiviación se eliminó añadiendo Na_2CO_3 , y la solución obtenida después de la filtración se evaporó para cristalizar $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ acompañado de Li_2CO_3 . Los sólidos se recuperaron mediante filtración y se redisolviaron en agua de la que se separó el Li_2CO_3 insoluble. Después de la eliminación del Li_2CO_3 , se inyectó CO_2 en la solución para formar LiHCO_3 soluble y otras impurezas precipitadas. Luego se realizó la filtración y el filtrado se calentó a 90°C para liberar CO_2 para la reprecipitación de Li_2CO_3 . El análisis químico mostró que el producto final de Li_2CO_3 tenía una pureza del 99,9%.

2.1.8.3 Procesamiento de zinnwaldita, ambligonita y petalita

Existen pocos estudios sobre la extracción de litio de zinnwaldita, ambligonita y petalita. A continuación, se mencionan los procesos de producto final óptimo. Con un concentrado de zinnwaldita de poco más de 1 % de Li con CaSO_4 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se sintetizó a 950°C en 1 h. Aproximadamente, se extrajo 96 % de Li del concentrado y se obtuvo un licor de lixiviación que contenía $\sim 0,69$ g/L de Li cuando la calcina se lixivió con agua a 90°C utilizando una relación de masa líquido-sólido de 10:1. Se añadió una cantidad estequiométrica de K_2CO_3 al licor de lixiviación para eliminar el Ca como carbonato y luego la solución purificada se concentró por evaporación para producir un nuevo licor que contenía al menos 9 g/L de Li. El calcio residual también precipitó durante la evaporación y posteriormente se filtró. El licor rico en litio se sometió luego a precipitación de Li_2CO_3 usando K_2CO_3 a 90°C . El precipitado se separó después, se lavó con agua y se secó, obteniéndose como producto final Li_2CO_3 con una pureza del 99%. Posteriormente, se introdujo el CaCO_3 para recuperar litio de la zinnwaldita. La tostación de zinnwaldita y CaCO_3 a 825°C , seguida de la lixiviación con agua del calcinado a $90\text{-}95^\circ\text{C}$ dio como resultado una recuperación de Litio del 90 % junto con Rb. Se burbujeó dióxido de carbono en el licor de lixiviación y se ajustó el pH ~ 7 para precipitar Al, Si y Ca. Después de la filtración, el filtrado se calentó a 90°C para evaporar el 75 %

del agua presente en el licor y el Ca residual también precipitó durante este paso. Luego se realizó una evaporación fraccionada de la solución filtrada para eliminar secuencialmente el 85%, 95% y 98% de agua, lo que dio como resultado la cristalización de productos de Li_2CO_3 con purezas del 99%, 98% y 94%, respectivamente. En otra ruta muy eficiente, el licor de lixiviación obtenido se trató mediante extracción con solvente, con un poder de extraer el 97% de Li del licor. Además, la purificación y la carbonatación de la solución final purificada que contiene litio producirían Li_2CO_3 con una pureza del 99,5%. Así, el esquema en el que se cristalizó Li_2CO_3 a partir de la solución de carbonato refinada fue más simple y produjo mayores recuperaciones de producto en comparación con el que utilizó la solución de sulfato.

Posteriormente, otro quipo trató con un concentrado de zinnwaldita (~2 % Li_2O) para extraer litio mediante tostación utilizando yeso o sulfato de sodio como aditivo. El tratamiento térmico de una mezcla del concentrado y yeso a 1050 °C, seguido de una lixiviación a 85 °C, se extrajo un poco más de 80 % de Li. Mientras tanto, utilizando el mismo procedimiento de lixiviación para la calcina obtenida a partir de la tostación con sulfato de sodio del concentrado a 850 °C, se obtuvo una extracción de hasta el 97 % de Li.

2.1.8.4 Procesamiento de arcillas y otros minerales

Los procesos químicos que tratan las arcillas para recuperar litio se resumen y se muestran en la **Tabla N°8**. En 1988, Crocker y colaboradores de la Oficina de Minas de los EE. UU. informaron sobre un estudio extenso para recuperar litio de arcillas de baja calidad de Nevada. En el mejor de los casos, los ensayos que utilizan yeso y piedra caliza como aditivos demostraron ser la opción óptima para extraer litio de la arcilla de Nevada. La peletización de una mezcla de yeso, piedra caliza y arcilla en una proporción de masa de 3:3:5, seguida de una tostación a 1000°C durante 1 h y una lixiviación con agua, permitió extraer aproximadamente un 90 % de Li de la arcilla. La carbonatación del licor de lixiviación utilizando Na_2CO_3 produjo un 99 % de Li_2CO_3 puro y también se recuperaron sales de sulfato de sodio y potasio como subproductos.

Tabla N°8. Perfiles experimentales y resultados de varios estudios sobre el procesamiento de arcillas y otras fuentes

Tostación		Lixiviación/Presión de Lixiviación		Max. Recup.	Producto final -
Aditivo	Temp. (°C)	Extractante	Temp. (°C)	(%) Li	Pureza
SO ₂	700	H ₂ O	No declarado	~ 86	No incluido
HCl anhidro	700	H ₂ O	80	~ 70	
CaCO ₃ + HCl	750	H ₂ O	80	~ 80	Li ₂ CO ₃
Yeso + caliza	1000	H ₂ O	No declarado	~ 90	Li ₂ CO ₃ -99%
Yeso + caliza	915	H ₂ O	Ambiente	~ 88	Li ₂ CO ₃
Dolomita + CaSO ₄	1000	H ₂ O	95	92	Li ₂ CO ₃ .LiOH
No incluido		NaOH/KOH/ Na ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ Coc. H ₂ SO ₄	85 85-100	66	Li ₂ CO ₃
No incluido		7M H ₂ SO ₄	250	~ 90	Li ₂ CO ₃
No incluido		120 g/L H ₂ SO ₄	260	~ 68	No incluido
		300 g/L HCl	90	~ 76	
		120 g/L H ₂ SO ₄	269	~ 71	
		300 g/L HCl	90	~ 49	

Fuente: Elaborado por Tam Tran, Van T. Luong. (2015)

Por otro lado, en el 2013 se patentó un método que utiliza dolomita y CaSO₄ para transferir los valores de Li contenidos en una arcilla montmorillonita hectorítica (0,1-1 % de Li) a compuestos lixiviables con agua. La tostación de la arcilla con los ingredientes añadidos a 1000 °C durante 1 h y la posterior lixiviación del calcinado obtenido a 95 °C durante 0,5 h dieron como resultado una extracción de Li mayor a 90%. Después de concentrar el licor de lixiviación por evaporación, la solución rica en Li obtenida se enfrió para cristalizar las sales de Na₂SO₄ y K₂SO₄ y fueron eliminados por filtración. Se puede obtener LiOH mediante electrodiálisis o Li₂CO₃ mediante carbonatación de la solución de alimentación.

2.1.9 Técnicas de Caracterización microestructural

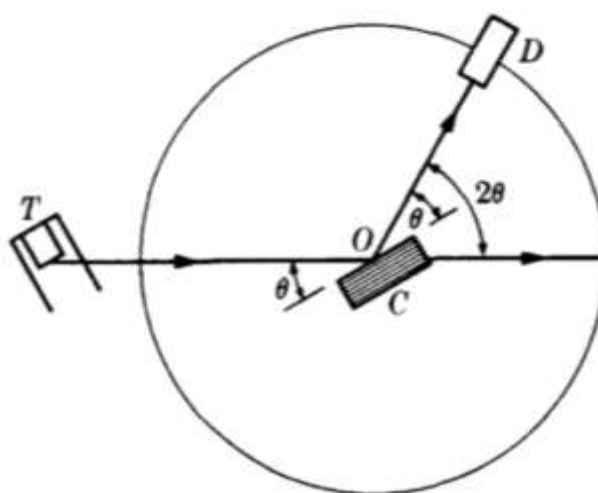
2.1.9.1 Análisis por Difracción de Rayos-X (XRD)

El método de Difracción de Rayos-X (XRD) es probablemente el más utilizado en la ciencia de las películas finas cristalinas. La más simple y quizás más importante aplicación de la técnica, es determinar la estructura cristalina de una muestra. Esto puede hacerse tanto para nuevos materiales,

con la ayuda de simulaciones; como para fases previamente conocidas al compararlo con una data patrón.

Las características esenciales de un espectrómetro de rayos X se muestran en la **Figura N°6**. Rayos-X del tubo T incide en un cristal C que puede ajustarse en cualquier ángulo deseado al haz incidente girando alrededor de un eje a través de O, el centro del círculo del espectrómetro. D es un contador que mide la intensidad de los rayos X difractados; También se puede girar alrededor de O y establecer en cualquier posición angular deseada. El cristal se corta generalmente o escinde de modo que un conjunto particular de reflejar planos de separación conocido es paralelo a su superficie, como lo sugiere el dibujo. En uso, el cristal se coloca de modo que sus planos reflectores formen un ángulo particular θ con el haz incidente, y D se establece en el ángulo correspondiente 2θ . Luego se mide la intensidad del haz difractado y se calcula su longitud de onda a partir de la Ley de Bragg **$n\lambda=2d \sin\theta$** , este procedimiento se repite para varios ángulos θ . W. H. Bragg diseñó y usó el primer espectrómetro de rayos X, y el físico sueco Siegbahn lo convirtió en un instrumento de muy alta precisión. Las mediciones de longitud de onda hechas de la manera descrita son obviamente relativas, y su precisión no es mayor que la precisión con la que se conoce el espaciado plano del cristal. (Mackenzie RC, 1970, p 346-349)

Figura 6. Espectrómetro de Rayos X.



Fuente: Cullity y Stock (2014)

2.1.9.2 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Agranda características pequeñas u objetos que de otro modo serían invisibles a la vista humana mediante el uso de un haz de electrones en lugar de la luz que se utiliza para formar imágenes en los microscopios ópticos de luz. Las imágenes se obtienen al escanear un haz de electrones de alta energía sobre la superficie de la muestra, de ahí el nombre de microscopio electrónico de barrido. En virtud de su longitud de onda más pequeña, los electrones pueden resolver características/detalles más finos de los materiales en una medida mucho mayor en comparación con la luz óptica. Un SEM moderno puede ampliar objetos hasta un millón de veces su tamaño original y puede resolver características más pequeñas que 1 nm de dimensión. De manera similar, la interacción del haz de electrones con la muestra emite rayos X con una energía única que se puede detectar para determinar la composición del material bajo examen. El SEM es, por lo tanto, una herramienta utilizada para la caracterización de materiales que proporciona información sobre la estructura de la superficie o cerca de la superficie, la composición y los defectos en materiales a granel. Permite a los científicos observar superficies a nivel submicrónico y nanométrico para elaborar propiedades de los materiales. Se ha convertido en uno de los instrumentos más potentes y versátiles, igualmente valioso para los científicos de materiales y de la vida que trabajan en industrias de amplio espectro. (Ul-Hamid, A., 2018, Vol. 1, p. 402).

A) Resolución de imagen en el microscopio electrónico de barrido

El ojo humano no puede distinguir objetos de un tamaño inferior a 200 μm (0,2 mm). En otras palabras, la resolución del ojo humano es de 200 μm , mientras que un microscopio óptico puede ampliar las imágenes hasta 1000X para resolver detalles de hasta 0,2 μm . El límite de resolución se define como la distancia mínima distinguible que separa dos objetos, es decir, la distancia mínima resoluble. Así, si la distancia entre los objetos se reduce aún más a menos de 0,2 μm , el microscopio óptico ya no podrá discernirlos como dos objetos separados, que aparecerán como una sola entidad. Por lo tanto, 0,2 μm puede definirse como el límite de resolución del

microscopio óptico. De ello se deduce que cuanto menor sea el valor de la distancia mínima resoluble, mayor será la resolución de un microscopio.

Tanto el microscopio óptico como los humanos utilizan la luz visible como un medio para explorar o interactuar con un objeto. La mayor capacidad para observar detalles en un microscopio óptico en comparación con el ojo sin ayuda se atribuye al sistema de lente/apertura utilizada para ampliar la imagen de un objeto. En teoría, es posible seguir ampliando la imagen aumentando el aumento indefinidamente. Sin embargo, no es posible seguir revelando detalles nuevos en un objeto simplemente aumentando el aumento. Los detalles finos de una imagen no se pueden resolver más allá de un cierto aumento. Esto se debe a las limitaciones impuestas por el poder de resolución de la técnica de obtención de imágenes, así como por el del ojo humano. El aumento útil máximo más allá del cual no se revelan más detalles está determinado por el poder de resolución de un microscopio. Se puede utilizar la siguiente ecuación para determinar el aumento útil típico de un microscopio:

$$\text{Aumento útil} = \frac{\text{Resolución del ojo humano}}{\text{Resolución del microscopio}}$$

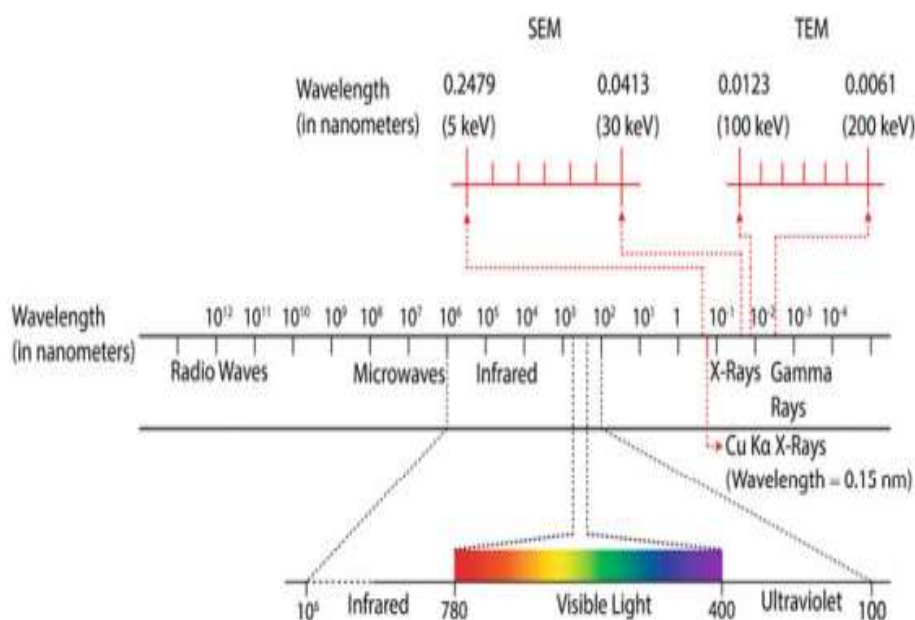
Para un microscopio óptico, el aumento útil $\left(\frac{200 \mu\text{m}}{0.2 \mu\text{m}}\right)$ es de alrededor de 1000X. Para un microscopio electrónico de barrido, el aumento útil $\left(\frac{200 \mu\text{m}}{1 \text{ nm}}\right)$ es típicamente de 200,000X.

El aumento de la resolución del instrumento se traduce en un aumento de su aumento útil.

La capacidad de la luz visible para resolver los detalles de la imagen está limitada por su longitud de onda relativamente grande ($\lambda \frac{1}{4}$ 380–760 nm) **(Figura 7)**. El uso de luz con una longitud de onda más corta (como la ultravioleta) y una lente sumergida en aceite (alto índice de refracción) mejora la resolución hasta alrededor de 0,1 μm . Si la imagen se forma utilizando una radiación con una longitud de onda más pequeña, como un haz de electrones, se puede alcanzar un límite de resolución más alto, ya

que cuanto menor sea la longitud de onda, mayor será el poder de resolución y mayor será el detalle revelado en una imagen.

Figura 7. Espectro electromagnético que muestra el tamaño de la longitud de onda utilizada en la luz, el SEM y el TEM.

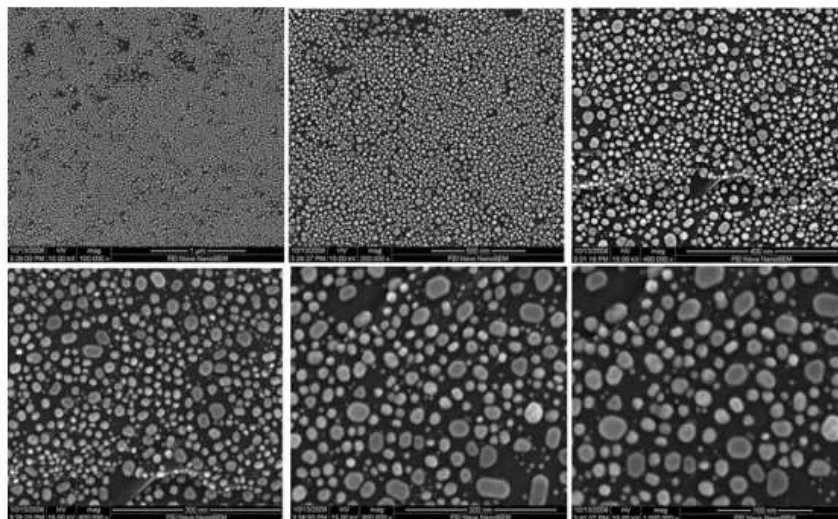


Fuente: Ul-Hamid, A. (2018).

Debido a este hecho, técnicas como el SEM y el TEM emplean un haz de electrones para sondear el material, lo que da como resultado una imagen muy superior en resolución en comparación con la del microscopio óptico. Por ejemplo, un haz de electrones (λ de 0,000004 μm) con un voltaje de aceleración de 100 kV puede alcanzar una resolución de 0,24 nm. El límite práctico de la resolución está determinado por las aberraciones y los defectos de la lente. Los microscopios electrónicos de emisión de campo modernos, que normalmente funcionan con voltajes de aceleración de 20 a 30 kV, pueden lograr una resolución de imagen del orden de 1 nm o mejor. Vale la pena señalar aquí que el poder de resolución o resolución (un término más comúnmente utilizado) de un instrumento se demuestra mediante el uso de muestras ideales para ese instrumento por parte de los fabricantes. Por ejemplo, las bolas o el polvo de estaño se utilizan rutinariamente para el microscopio electrónico de emisión, ya que las primeras son conductoras y

tienen un fuerte contraste (**Figura 8**). Sin embargo, los detalles en muestras reales no suelen revelarse a ese nivel de resolución.

Figura 8. Imágenes de electrones secundarios de bolas de estaño que muestran un buen contraste con aumentos bajos a muy altos (100 000X a 1 000 000X).



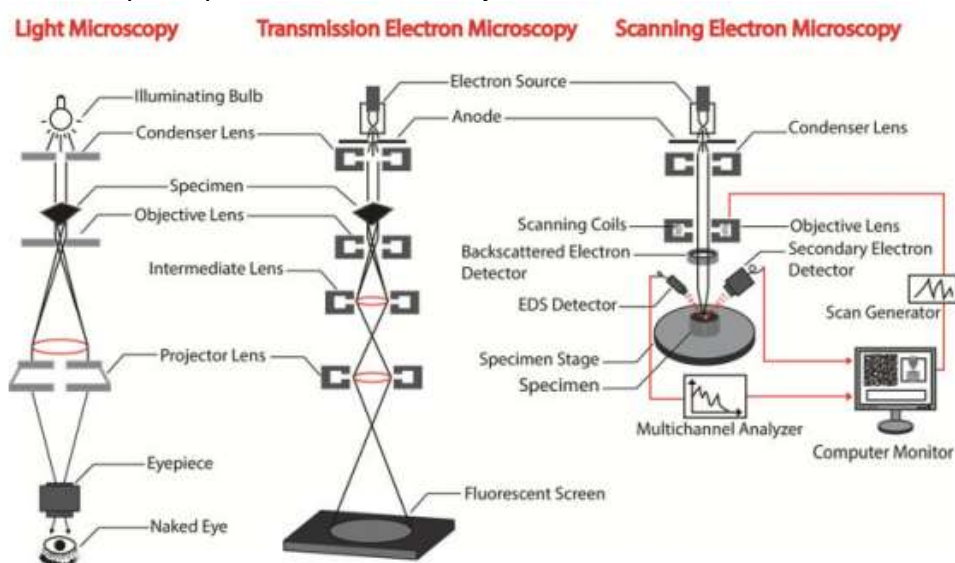
Fuente: Ul-Hamid, A. (2018).

B) Formación de imágenes en el SEM

El instrumento SEM puede considerarse que consta de tres secciones principales: la columna de electrones, la cámara de la muestra y los controles informáticos/electrónicos. La sección superior de la columna de electrones consta de un cañón de electrones que genera un haz de electrones. Las lentes electromagnéticas ubicadas dentro de la columna enfocan el haz en una sonda de diámetro pequeño (unos pocos nanómetros). Las bobinas de exploración de la columna hacen que la sonda pase sobre la superficie de la muestra presente en la cámara que se encuentra al final de la columna. El cañón, la columna y la cámara de la muestra se mantienen al vacío para permitir la generación y el avance del haz de electrones. Los electrones del haz penetran unos pocos micrones en la superficie de una muestra a granel, interactúan con sus átomos y generan una variedad de señales, como electrones secundarios y retrodispersados y rayos X característicos que se recogen y procesan para obtener imágenes y la química de la superficie de la muestra. La resolución lateral final de la imagen obtenida en el SEM corresponde al diámetro de la sonda de electrones. Los avances en el diseño

de lentes y cañones de electrones permiten obtener diámetros de sonda muy finos que dan resoluciones de imagen del orden de <1 nm. Para ofrecer una perspectiva de la forma en que se obtiene la imagen en el microscopio electrónico de barrido, en la **Figura 9** se muestra una comparación de cómo funcionan los microscopios ópticos y electrónicos de transmisión en comparación con el microscopio electrónico de barrido.

Figura 9. Esquema que compara los modos de formación de imágenes en los microscopios óptico, de transmisión y electrónico de barrido.



Fuente: Ul-Hamid, A. (2018).

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Litio: Es un metal sólido, que forma parte de los metales alcalinos y es el más ligero de todos. Posee un punto de fusión bajo y altamente reactivo. Además, posee una alta capacidad calorífica, un amplio intervalo de temperatura de la fase líquida, alta conductividad térmica, baja viscosidad y muy baja densidad.

Hidrometalurgia: Rama de la metalurgia extractiva que trata los procesos metalúrgicos en medios acuosos, que permiten la extracción y recuperación de metales y/o compuestos a partir de sus minerales o materiales reciclados (residuos, escorias, cementos metálicos, lodos anódicos, etc.). La

hidrometalurgia se categoriza principalmente en tres: 1. Lixiviación, 2. Concentración y Purificación y 3. Precipitación.

Lixiviación (Leaching): operación unitaria cuyo fin es disolver de manera particular o completa un sólido con el objetivo de recobrar especies metálicas deseadas.

Solución de lixiviación (PLS): El producto de solución de lixiviación, por lo general contiene el metal deseado, los metales se disuelven como cationes, por ejemplo, Cu^{2+} , Zn^{2+} , etc., o como iones complejos, tales como CuCl_2^- , $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, $\text{Zn}(\text{NH}_3)_4^{2+}$, etc.

Separación sólido - líquido: El proceso de eliminación de los sólidos a partir de una solución. Después de la lixiviación este suele ser el siguiente paso necesario. Esta es una etapa crucial en el proceso hidrometalúrgico. Puede ser difícil y costoso. Muchos procesos hidrometalúrgicos en el pasado resultaron demasiado difíciles para lograr la separación.

Relaves: El residuo sólido que queda después de la lixiviación. Si este tiene un valor adicional puede ser procesado posteriormente. De lo contrario, es un desperdicio. Sólidos de relaves se asocian a menudo con agua de lavado. La mezcla de residuos se almacena o son incautados en pozas de relaves (o colas).

Purificación / concentración: Se refiere al tratamiento de la solución de lixiviación para convertir el metal de interés en una solución pura, las impurezas pueden ser eliminadas o el metal de interés puede ser transferido a otra solución.

Tostación: Proceso de calentamiento y descomposición de un mineral a altas temperaturas. El sulfuro tostado forma el SO_2 gas, óxidos metálicos, sulfatos o sulfuros con alto contenido metálico.

Precipitación: Diversos procesos utilizados para formar un sólido de la solución. En este contexto, estamos hablando de la precipitación de un metal en un producto. Este puede ser un compuesto, como un sulfuro o el propio metal.

CAPÍTULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

3.1 Descripción de la metodología de investigación

- Enfoque de la investigación:

La presente investigación tuvo un enfoque *Cuantitativo*, que se refleja al poseer las 16 características mencionadas por Metodología de la investigación de Hernández Sampieri (2014). Además, que proceden de un orden riguroso y secuencial con resultados objetivos.

- Alcances de la investigación:

El objeto de estudio de la presente tesis (mineral de tobas volcánicas de la Región Puno) ha sido abordado muy poco y según los resultados esta tesis tiene como fin poder dar explicación a las causas de éstos, por tanto el alcance que se tiene en una primera instancia es ser exploratorio y finalmente llegar a ser explicativo, teniendo las definiciones de estos alcances a través de Metodología de la investigación de Hernández Sampieri (2014).

- Población y muestra: Región Puno / tobas volcánicas

- Tipo de diseño: Diseño experimental

Una investigación es experimental cuando el investigador manipula deliberadamente una o más variables independientes para observar y medir sus efectos en una variable dependiente, bajo condiciones controladas. Su objetivo es establecer relaciones de causa y efecto.

Características de una investigación experimental:

1. Manipulación de variables: Se modifica una variable independiente para evaluar su impacto en la variable dependiente. En la presente tesis, se manipuló tanto los reactantes como los equipos a usar para la lixiviación.

2. Control de factores externos: Se minimizan o eliminan factores ajenos que puedan influir en los resultados.
3. Grupo de control y grupo experimental: Se comparan los resultados entre un grupo que recibe el tratamiento de tostación y lixiviación y otro que no lo recibe o muestra inicial.
4. Repetibilidad: Los experimentos pueden replicarse para validar los resultados.

3.2 Técnicas e instrumentos de análisis y procesamiento de datos.

- Chancado con mortero.
- Caracterización de la muestra en polvo por Difracción de Rayos X.
- Pruebas de Tostación en Horno tipo Mufla de la muestra en polvo con reactantes.
- Pruebas de Lixiviación empleando planchas de calentamiento con agitación magnética, manta calentadora y baño de ultrasonido, haciendo uso de agua destilada.
- Análisis por Absorción Atómica de las soluciones lixiviadas.
- Formación del Carbonato de Litio.
- Caracterización de las muestras de residuos por Difracción de Rayos X.

3.3 Etapas de intervención del estudio.

- Caracterización del mineral de estudio.
- Diseño y desarrollo de proceso de chancado, tostación y lixiviación de muestras.
- Desarrollo de los procesos planificados.
- Análisis de resultados y repetición de mejores resultados.

3.4 Procedimiento Experimental

La muestra original fue recibida de la meseta Macusani de la región Puno y se confirmó la presencia del elemento litio en rocas de tobas volcánicas. En la **Figura 10** se puede observar la muestra de toba volcánica.

Figura 10. Muestra original de Toba Volcánica de meseta Macusani.



Fuente: Elaboración propia

Para poder convertir la muestra de la toba volcánica en forma de “polvo”, se empleó un mortero tal como se puede observar en la **Figura 11**, teniendo ya la muestra en forma de polvo se comenzó el procedimiento experimental.

Figura 11. Conversión de la muestra original a “polvo” empleando mortero



Fuente: Elaboración propia

La muestra X1 original de la toba volcánica que fue convertida en polvo fue enviada a ser analizada por Difracción de Rayos-X (DRX), mientras

que la muestra M2 fue enviada a analizar por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería – UNI (**Figura 12**).

Figura 12. Muestra X1 a analizar por DRX y muestra M2 por SEM

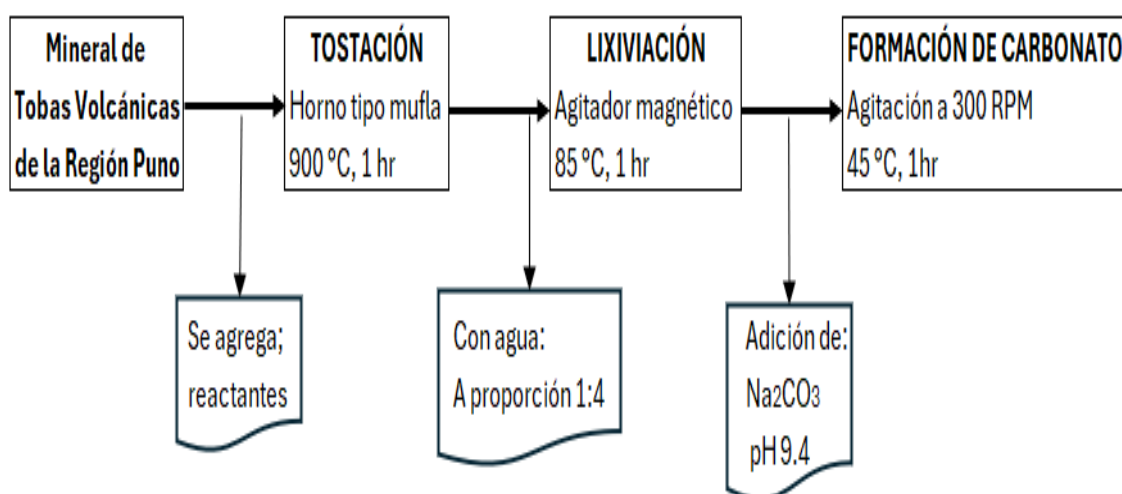


Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Pasos del procedimiento experimental:

De forma general, se presenta el esquema que se continuó para la obtención final de carbonato de litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno.

Figura 13. Esquema del Procedimiento Experimental



Fuente: Elaboración propia.

- a. Se pesó 10 gr de muestra en polvo de la muestra original de la toba volcánica de Li en una balanza analítica, colocándolas en crisol, tal como se puede observar en la **Figura 14**.

Figura 14. Pesaje de la muestra original de litio en 10gr.



Fuente: Elaboración propia

- b. Se hizo 4 pesajes de muestras de tobas volcánicas de litio de 10 gr a las cuales luego se les agregó 2gr de carbonatos y sulfatos de Calcio y sodio, tal como se puede observar en la **Figura 15**. Además, se preparó dos muestras más empleando también 10gr de tobas volcánicas de litio, a las cuales se le adicionó: 2gr de CaCO_3 + 4gr de Na_2SO_4 y 2gr de Na_2CO_3 + 4gr de CaSO_4 , tal como se puede observar en la **Figura 16**.

Figura 15. Pesaje de la muestra original de litio en 10gr en 4 crisoles a las cuales se le agregó 2gr de CaCO_3 , 2gr de Na_2CO_3 , 2gr de Na_2SO_4 y 2gr de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Se preparó 2 crisoles con 10gr de tobas volcánicas de litio, a las cuales se le adicionó: 2gr de CaCO_3 + 4gr de Na_2SO_4 y 2gr de Na_2CO_3 + 4gr de CaSO_4 .



Fuente: Elaboración propia

- c. Las 4 primeras muestras preparadas fueron enviadas a pruebas de tostación en un horno tipo mufla a la temperatura de 900°C por un tiempo de 1 hr, tal como se puede observar en la **Figura 17**.

Figura 17. Tostación de las 6 muestras en horno tipo Mufla a 900°C por 1 hr.



Fuente: Elaboración propia

Luego de cumplirse el tiempo, la hora y el secado se retiraron las muestras tal como se puede observar en la **Figura 18**.

Figura 18. Muestras sometidas a tostación a 900°C por 1hr y luego retiradas del horno tipo mufla.



Muestra Li + CaCO₃ Tostación 900°C-1hr	Muestra Li + Na₂CO₃ Tostación 900°C-1hr	Muestra Li + Na₂SO₄ Tostación 900°C-1hr	Muestra Li + CaSO₄.2H₂O Tostación 900°C-1hr
---	---	---	---

Fuente: Elaboración propia

- d. Las dos muestras con contenidos de carbonato de sodio – sulfato de calcio y carbonato de calcio – sulfato de sodio, fueron también sometidas a pruebas de tostación a la temperatura de 900°C por tiempo de 1hr y luego las muestras fueron retiradas del horno tipo mufla, tal como se puede observar en la **Figura 19**.

Figura 19. Muestras con contenido de carbonato y sulfato sometidas a tostación a 900°C por 1hr y luego retiradas del horno tipo mufla.



Fuente: Elaboración propia

- e. Luego las 4 primeras muestras tostadas fueron colocadas en la balanza analítica para realizar los pesos respectivos y luego fueron sometidas a pruebas de lixiviación empleando agua destilada en la proporción de 1 a 4 tal como se puede observar en la **Figura 20**.

Para las pruebas de lixiviación se empleó una **Plancha de Calentamiento con Agitación Magnética múltiple**, los vasos de precipitado conteniendo las muestras tostadas con agua destilada fueron colocados adicionando magneto en cada uno de ellos y también ordenando sus posiciones, tal como se puede ver en la **Figura 21**.

Figura 20. Pesaje de las muestras calcinadas y luego se le adicionó agua destilada en la proporción 1:4



Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Vasos de precipitados conteniendo las muestras tostadas a 900°C por 1hr y lixiviadas con agua destilada colocadas en Plancha de Calentamiento con Agitación Magnética.



Fuente: Elaboración propia

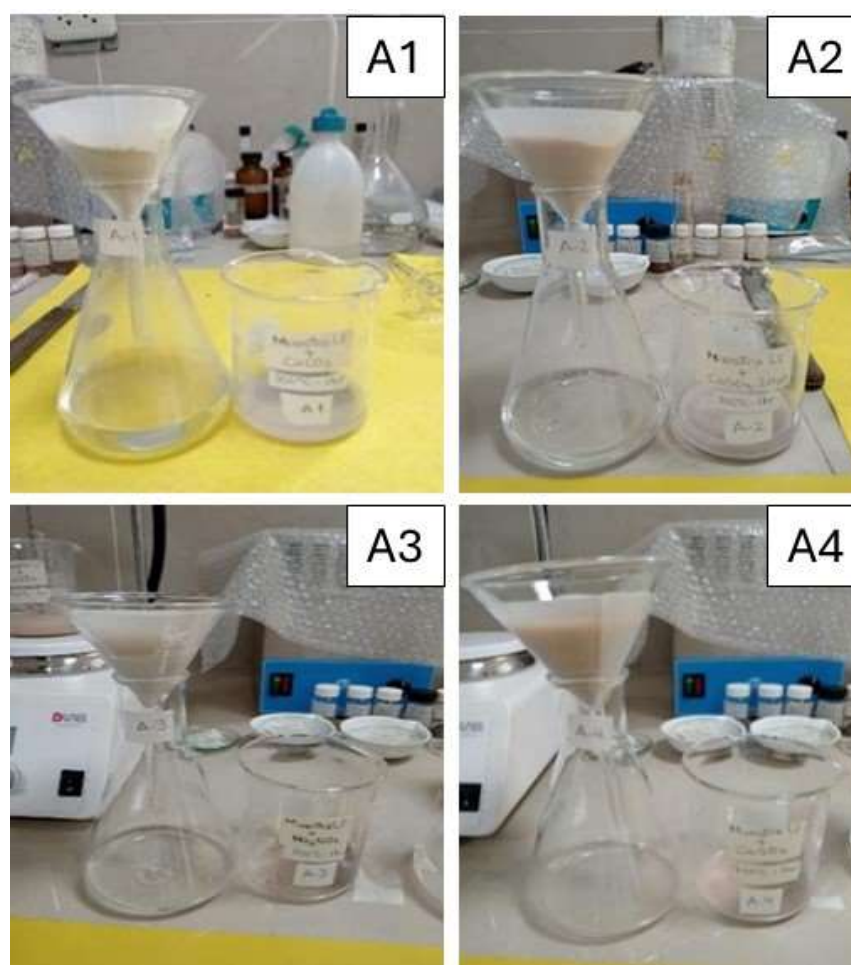
- f. El proceso de lixiviación fue realizado a la temperatura de 85°C por un tiempo de 60 minutos tal como se puede observar en la **Figura 22**. Luego las muestras fueron filtradas y las soluciones liquidas quedaron colocadas en matraces como se puede ver en la **Figura 23**, mientras que los residuos sólidos húmedos quedaron en los papeles de filtro (**Figura 24**).

Figura 22. Proceso de lixiviación fue realizado a 85°C por 60 minutos



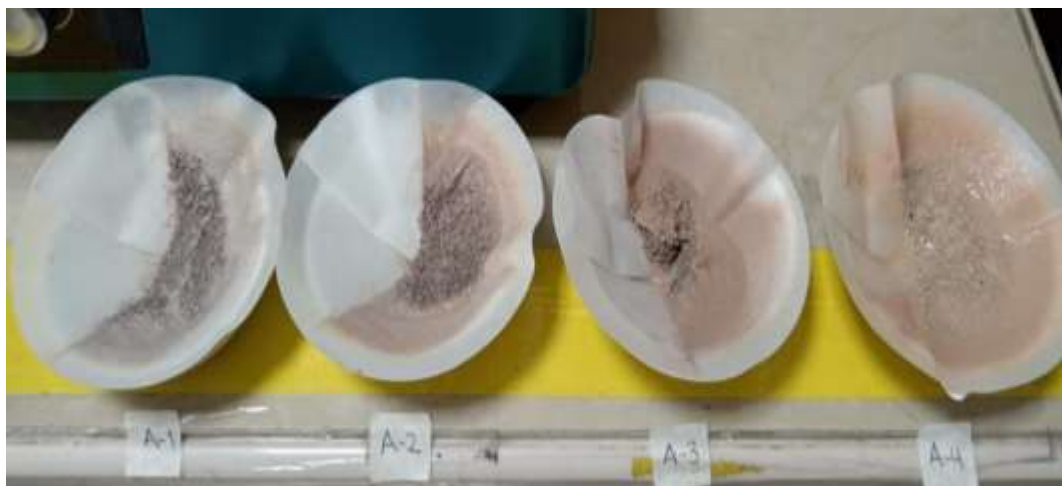
Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Filtrado de las pruebas de lixiviación, soluciones líquidas en matraces.



Fuente: Elaboración propia

Figura 24. Residuos sólidos húmedos de la lixiviación en papeles de filtro.



Fuente: Elaboración propia

- g.** Luego las 2 muestras tostadas que contenían carbonato y sulfato fueron sometidas a pesaje y luego fueron adicionadas de agua destilada en la proporción de 1 a 4 para su proceso de lixiviación tal como se puede observar en la **Figura 25**.

Figura 25. Pesaje de las 2 muestras calcinadas y luego se le adicionó agua destilada en la proporción 1:4



Fuente: Elaboración propia

- h. El proceso de lixiviación también fue realizado a la temperatura de 85°C por un tiempo de 60 minutos para las muestras que fueron tostadas con carbonato y sulfato tal como se puede observar en la **Figura 26**. Luego las muestras fueron filtradas y las soluciones líquidas quedaron colocadas en matraces, mientras que los residuos sólidos húmedos quedaron en los papeles de filtro y luego fueron colocados en la estufa para su secado (**Figura 27**).

Figura 26. Proceso de lixiviación fue realizado a 85°C por 60 minutos en planchas de calentamiento con agitación magnética.



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Residuos sólidos húmedos en papeles de filtro y luego fueron colocados en estufa para su secado a 80°C por 4hr.



Fuente: Elaboración propia

- i. Según los resultados de absorción atómica de las soluciones lixiviadas y su análisis como se detalla en el capítulo IV de esta tesis. Se realizó los pasos a, b, c y d para las muestras: N°7 (Mineral Macusani: 10 gramos + Na_2SO_4 : 4 gramos), N°8 (Mineral Macusani: 10 gramos + Na_2SO_4 : 8 gramos + CaCO_3 : 4 gramos) y N°9 (Mineral Macusani: 10 gramos + Ca_2SO_4 : 8 gramos + NaCO_3 : 4 gramos). Y luego, se procedió a adicionar agua destilada en la proporción de 1 a 4 tal como se puede observar en la **Figura 28**, pesando 12 gr de la muestra tostada y 36 gr de agua destilada.

Figura 28. Pesaje de 12 gr de muestra N°7 y 36 gr de agua destilada para la lixiviación



Fuente: Elaboración propia

- j. Utilizando otros equipos como otras alternativas a la Plancha de Calentamiento con Agitación Magnética, se utilizó:
- i) Para la muestra N°7 una **Manta Calentadora con Agitador Magnético** lixiviando con agua destilada a la temperatura de 85°C y por un tiempo de 60 min, tal como se observa en la **Figura 29**.
 - ii) Para las muestras N° 8 y 9, los vasos de precipitado conteniendo las muestras tostadas con agua destilada fueron colocados en el equipo de baño de ultrasonido (**Figura 30**) y fueron llevados a lixiviar a 60°C por 60 min, tal como se puede ver en la **Figura 31**.

Figura 29. Proceso de lixiviación en Manta Calentadora a 85°C por 60 min de la muestra N°7



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Muestras N°8 y N°9, llevadas con el agua destilada en vasos precipitados al equipo de baño ultrasónico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Proceso de lixiviación de baño de ultrasonido lixiviando a 60°C por 60 min



Fuente: Elaboración propia

- k. Luego de la lixiviación de las muestras N°7, N°8 y N°9 se procedió a hacer el filtrado y las soluciones líquidas fueron colocadas en tubos de ensayo y luego se enviaron para sus lecturas por Absorción Atómica, mientras que los residuos sólidos húmedos quedaron en los papeles de filtro y luego fueron colocados en la estufa para su secado.
- l. Las muestras de residuos sólidos secadas fueron llevadas para análisis por Difracción de Rayos X para su caracterización mineralógica, con los rotulados D8, D9 y D10. Así mismo, la muestra cabeza u original de Macusani se envió para reensayo con la rotulación D11.

3.4.2 Análisis de la formación de Carbonato de Litio

De la primera experiencia, de las primeras seis muestras, obtenida la mayor cantidad de litio en la solución líquida que fue analizada se adicionó carbonato de sodio, Na_2CO_3 , y se midió el pH dando un valor de $\text{pH}=9.4$ como se muestra en la **Fig. 32**. Luego, la solución fue sometido a un calentamiento de 45°C y una velocidad de agitación de 300RPM en una plancha de calentamiento con agitación magnética, por un tiempo de 60 min

como se observa en la **Fig. 33**. Al finalizar el proceso se observó la formación de un precipitado que se muestra en la **Fig. 34**.

Figura 32. Verificación del pH de la solución lixiviada.



Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Preparación de carbonato de litio empleando Na_2CO_3 y calentando a 45 °C por 60 min a 300RPM.



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Formación de precipitado al finalizar el proceso de lixiviación con agitación y temperatura.



Fuente: Elaboración propia

Este precipitado fue filtrado (**Figura 35**) y secado en estufa. Al finalizar el secado se pesó la muestra de carbonato de litio obtenida con una cantidad de 1.786 gr (**Figura 36**) y luego fue colocada en unos tubitos para luego ser enviadas a ser analizadas por microscopia electrónica de barrido, tal como se muestra en la **Figura 37**.

Figura 35. Filtración del precipitado obtenido al formar carbonato de litio empleando Na₂CO₃



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Pesaje del carbonato de litio obtenido empleando Na_2CO_3



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Carbonato de litio en envase para su envío para analizar por SEM y verificar su composición y morfología.



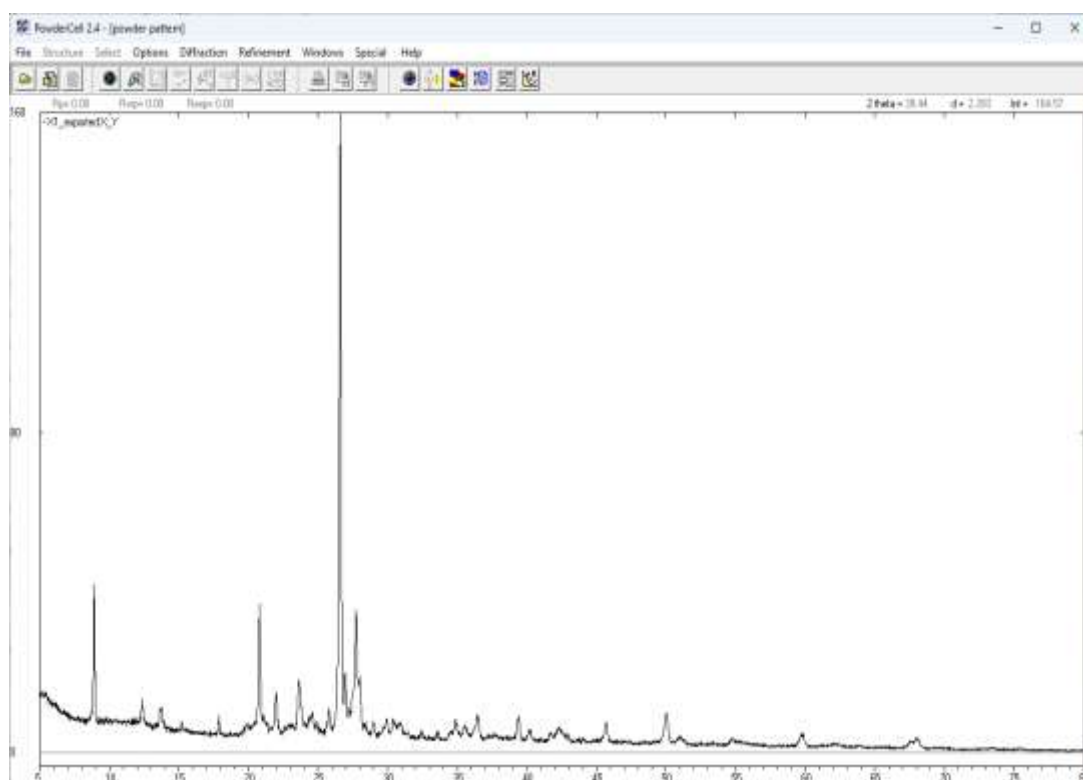
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

4.1 Análisis de muestra original por Difracción de Rayos X

Se recibió el difractograma DRX de la muestra D11 y se utilizó el Software PowderCell 2.4 para poder visualizar el resultado de la muestra, se pudo observar que la muestra es cristalina, en la **Figura 38**.

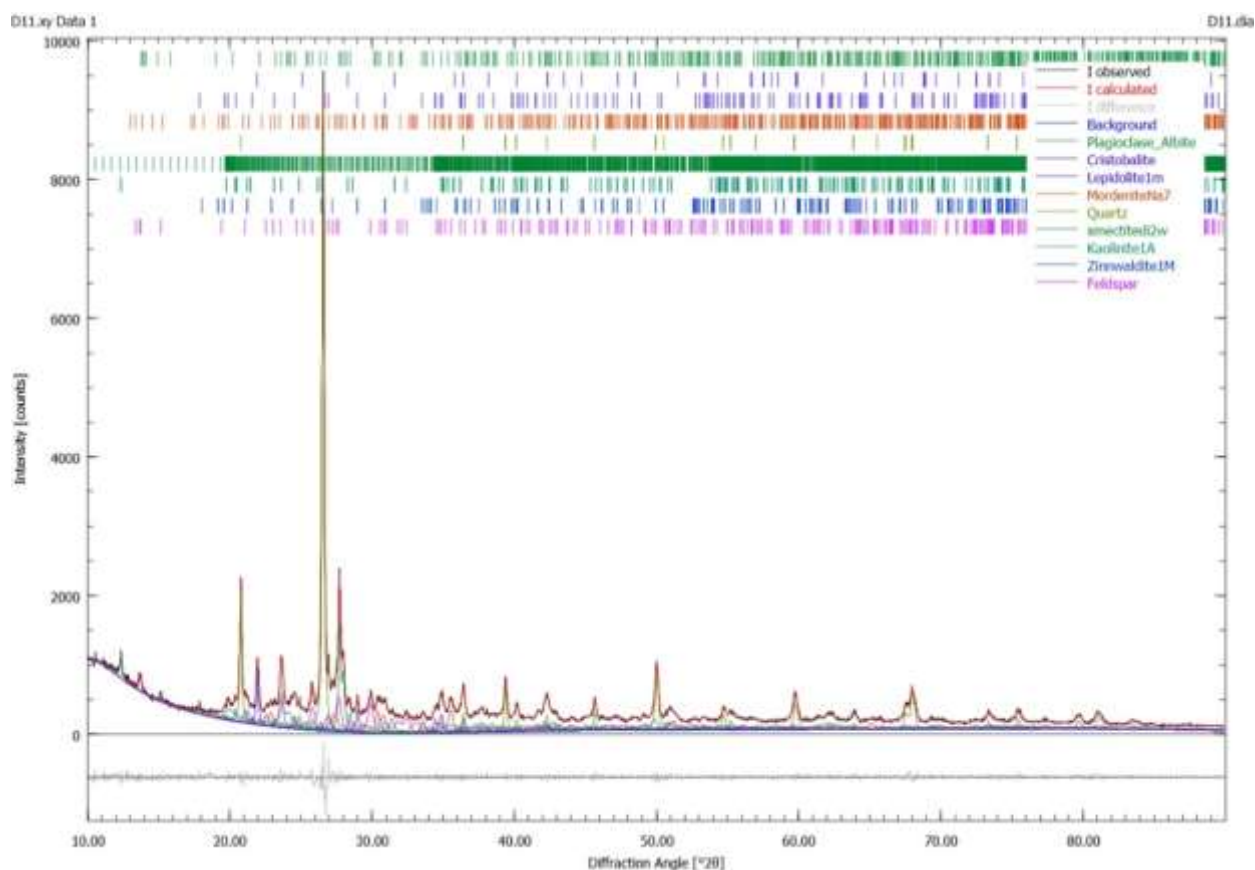
Figura 38. Difractograma DRX de la muestra D11 de la toba volcánica



20

Fuente: Elaboración propia

Para poder hacer el análisis del difractograma DRX con mayor detalle se empleó el Software PROFEX, en el cual se puede observar que existen una gran variedad de minerales presentes en la toba volcánica y a pesar de que existe una pequeña cantidad de litio esto aparece en la hoja de resultados del análisis por DRX, tal como se puede observar en la **Figura 39** y en la **Tabla N°9**.

Figura 39. Análisis del Difractograma DRX de la muestra D11 en PROFEX

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°9. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D11

Chemical Composition		
	Quantity Goal	Phase Quantity (wt-%)
Cristobalite	QCrystobalite	3.40
Feldspar	QFeldspar	5.80
Kaolinite1A	QKaolinite1A	4.53
Lepidolite1m	QLepidolite1m	12.20
MordeniteNa7	QMordeniteNa7	18.20
Plagioclase_Albite	QAlbite	18.40
Quartz	Qquartz	23.30
Zinnwaldite1M	QZinnwaldite1	1.11
smectitedi2w	Qsmectitedi2w	13.10
Weighted total		100.04

Fuente: Elaboración propia

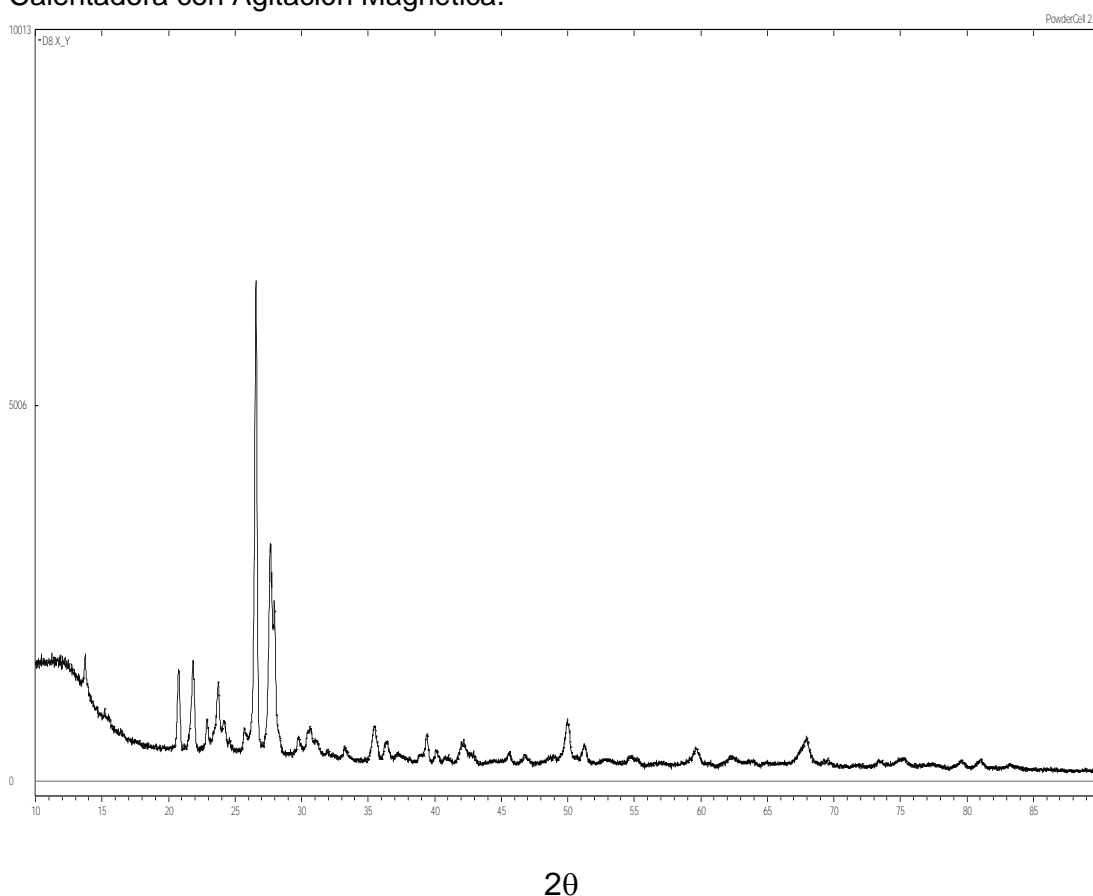
4.2 Análisis de muestra de residuos sólidos por Difracción de Rayos X.

PRUEBA N°7

Mineral Macusani: 10 gramos + Na_2SO_4 : 4 gramos

Se recibió el difractograma DRX de la muestra D08 que es el residuo de la prueba experimental realizada en la Manta Calentadora de la Prueba N°7 y se utilizó el Software PowderCell 2.4 para poder visualizar el resultado de la muestra, se puede observar que la muestra es cristalina, en la **Figura 40**.

Figura 40. Difractograma DRX de la muestra D08 de la prueba N°7 en Manta Calentadora con Agitación Magnética.

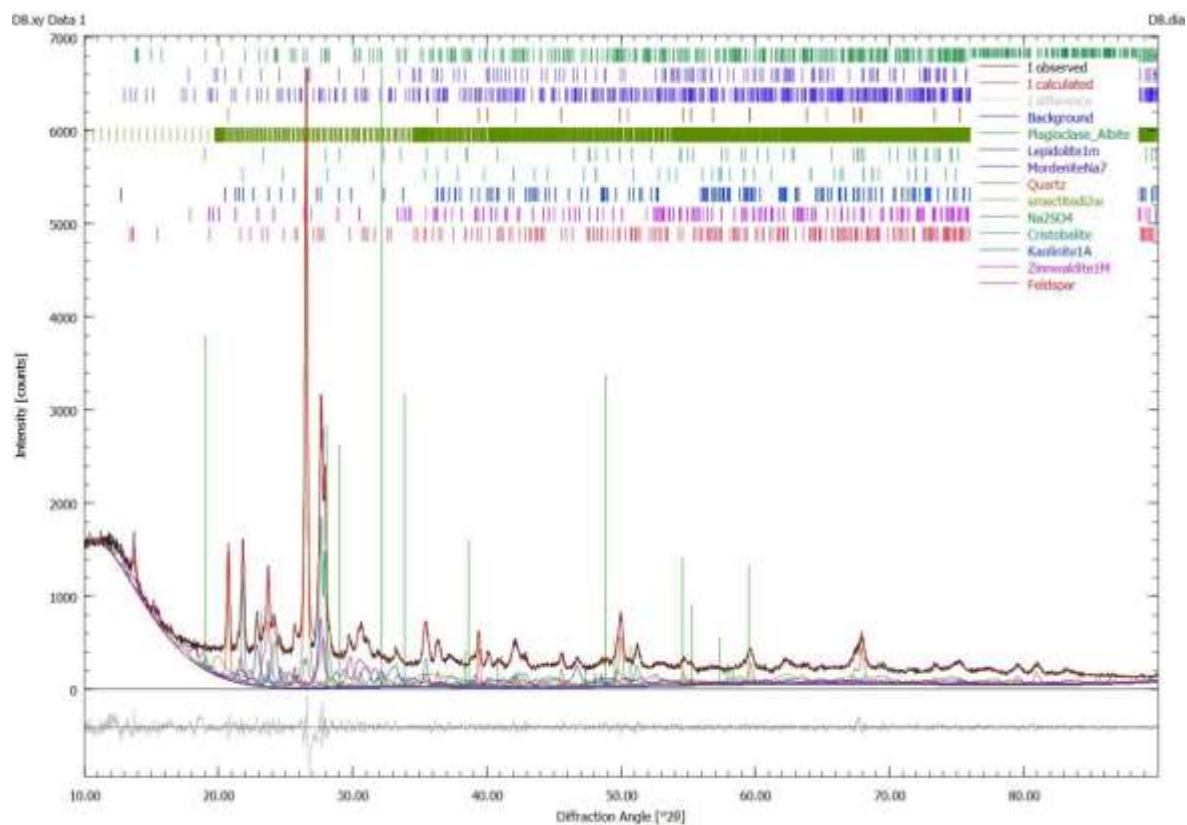


Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso del Software PROFEX, en el cual se puede observar que existen una cantidad similar de minerales presentes en la toba volcánica original, la cantidad de minerales se muestra en la hoja de resultados del

análisis por DRX, tal como se puede observar en la **Figura 41** y en la **Tabla N°10**.

Figura 41. Análisis del Difractograma DRX de la muestra D08 en PROFEX



Fuente: Elaboración propia

Tabla N°10. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D08.

Chemical Composition		
	Quantity Goal	Phase Quantity (wt-%)
Cristobalite	QCristobalite	2.60
Feldspar	QFeldspar	6.30
Kaolinite1A	QKaolinite1A	5.80
Lepidolite1m	QLepidolite1m	0.00
MordeniteNa7	QMordeniteNa7	24.10
Na2SO4	QNa2SO4	1.32
Plagioclase_Albite	QAlbite	23.70
Quartz	Qquartz	16.60
Zinnwaldite1M	QZinnwaldite1	2.32
smectitedi2w	Qsmectitedi2w	17.20
Weighted total		99.94

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de la D11 y de la D08 se pudo establecer que en la muestra de la toba volcánica original D11 se tiene 12.20% de lepidolita. La lepidolita es un mineral del grupo de las micas y fue descrita en 1792 por el químico alemán Martin Heinrich Klaproth. Datos de la lepidolita:

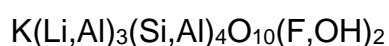
Color: Rosa, lila, rojo-rosado

Densidad: 2,83

Dureza: 2,5 - 3,5 (Mohs)

Exfoliación: Perfecta

Fórmula química: genérica para el grupo:



En el caso de muestra D08 que es de residuo sólido de la Manta Calentadora con Agitación Magnética se pudo observar que desapareció la lepidolita ya que se tiene un 0% en el reporte de refinamiento.

PRUEBA N°8

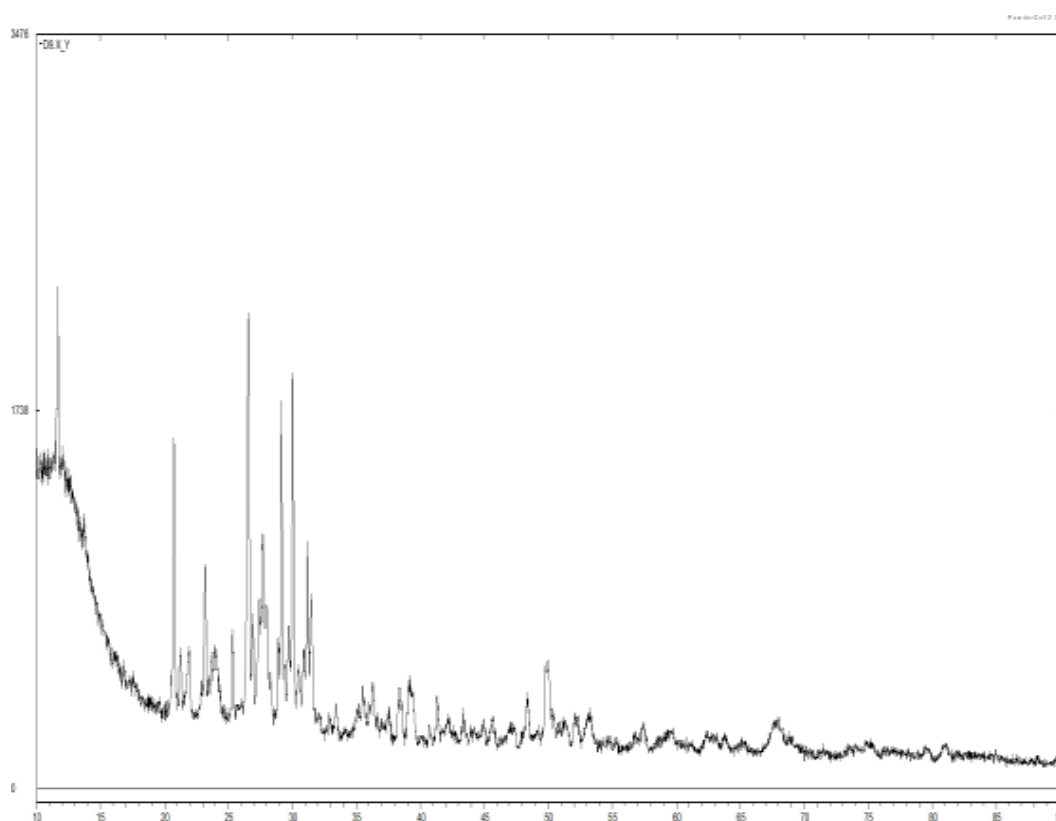
Mineral Macusani: 10 gramos + Na₂SO₄: 8 gramos + CaCO₃: 4 gramos

Se recibió el difractograma DRX de la muestra D09 que es residuo de la Prueba N°8 del Baño de Ultrasonido y se utilizó el Software PowderCell 2.4 para poder visualizar el resultado de la muestra, se puede observar que la muestra de residuo también es cristalina, pero diferente a la D08 ya que en la Prueba N°7 se utilizó solo sulfato de sodio, en cambio en la Prueba N°8 se utilizó sulfato de sodio y carbonato de calcio, en la **Figura 42**.

Haciendo uso del Software PROFEX, en el cual se puede observar que existen una cantidad similar de minerales presentes en la toba volcánica original y otros más, la cantidad de minerales se muestra en la hoja de resultados del análisis por DRX, tal como se puede observar en la **Figura 43** y en la **Tabla N°11**.

Se puede observar en la Tabla N°11 que no hay Lepidolita $K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$ ni Zinnwaldite $KLiFe^{2+}Al(AlSi_3)O_{10}(OH, F)_2$, pero si existe fosfato de Litio, Li₂PO₄ beta.

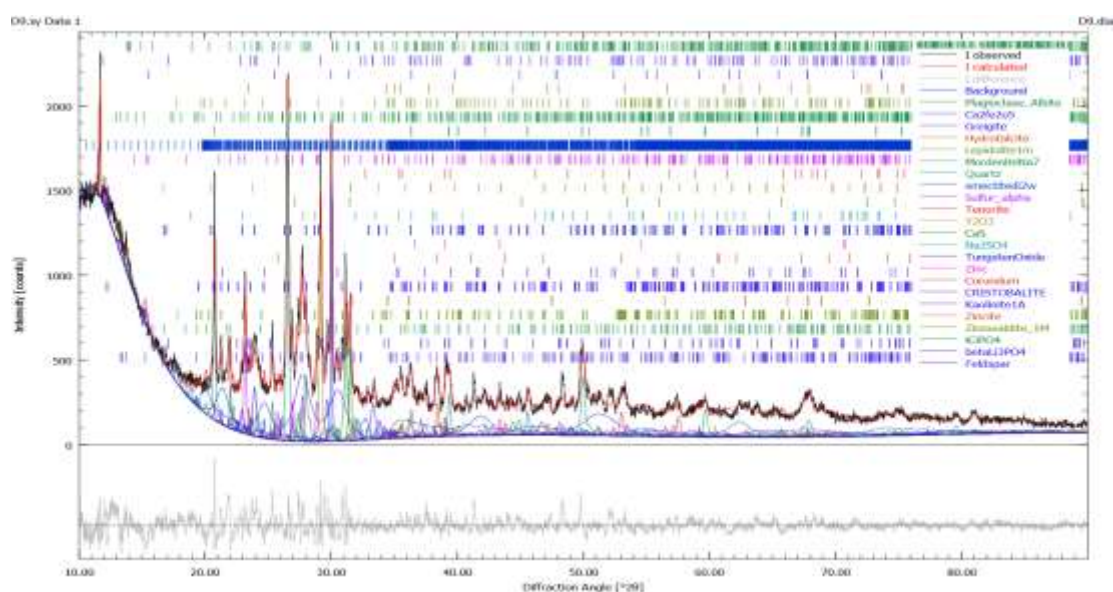
Figura 42. Difractograma DRX de la muestra de residuo D09 de la prueba N°8 en Baño de Ultrasonido con sulfato de sodio carbonato de calcio.



20

Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Análisis del Difractograma DRX de la muestra D09 en PROFEX



Fuente: Elaboración propia

Tabla N°11. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D09.

Chemical Composition			
	Quantity Goal	Phase Quantity (wt-%)	
CRISTOBALITE	Qcristobalite ▾	14.50	
Ca2fe2o5	Qca2fe2o5 ▾	2.09	
CaS	QCaS ▾	0.22	
Corundum	QCorundum ▾	9.00	
Feldspar	QFeldspar ▾	0.45	
Greigite	Qgreigite ▾	19.00	
Hydrotalcite	Qhydrotalcite ▾	1.00	
K3PO4	QK3PO4 ▾	4.44	
Kaolinite1A	QKaolinite1A ▾	1.22	
Lepidolite1m	Qlepidolite1m ▾	0.00	
MordeniteNa7	QmordeniteNa7 ▾	3.20	
Na2SO4	QNa2SO4 ▾	1.35	
Plagioclase_Albite	Qalbite ▾	4.03	
Quartz	Qquartz ▾	16.60	
Sulfur_alpha	Qsulfur ▾	4.40	
Tenorite	Qtenorite ▾	0.46	
TungstenOxide	QTungstenOxide ▾	0.56	
Y2O3	Qy2o3 ▾	0.32	
Zinc	QZinc ▾	0.12	
Zincite	Qzincite ▾	0.50	
Zinnwaldite_1M	Qzinnwaldite ▾	0.00	
betaLi3PO4	QbetaLi3PO4 ▾	2.64	
smectitedi2w	Qsmectitedi2w ▾	14.30	
Weighted total		100.40	

Fuente: Elaboración propia

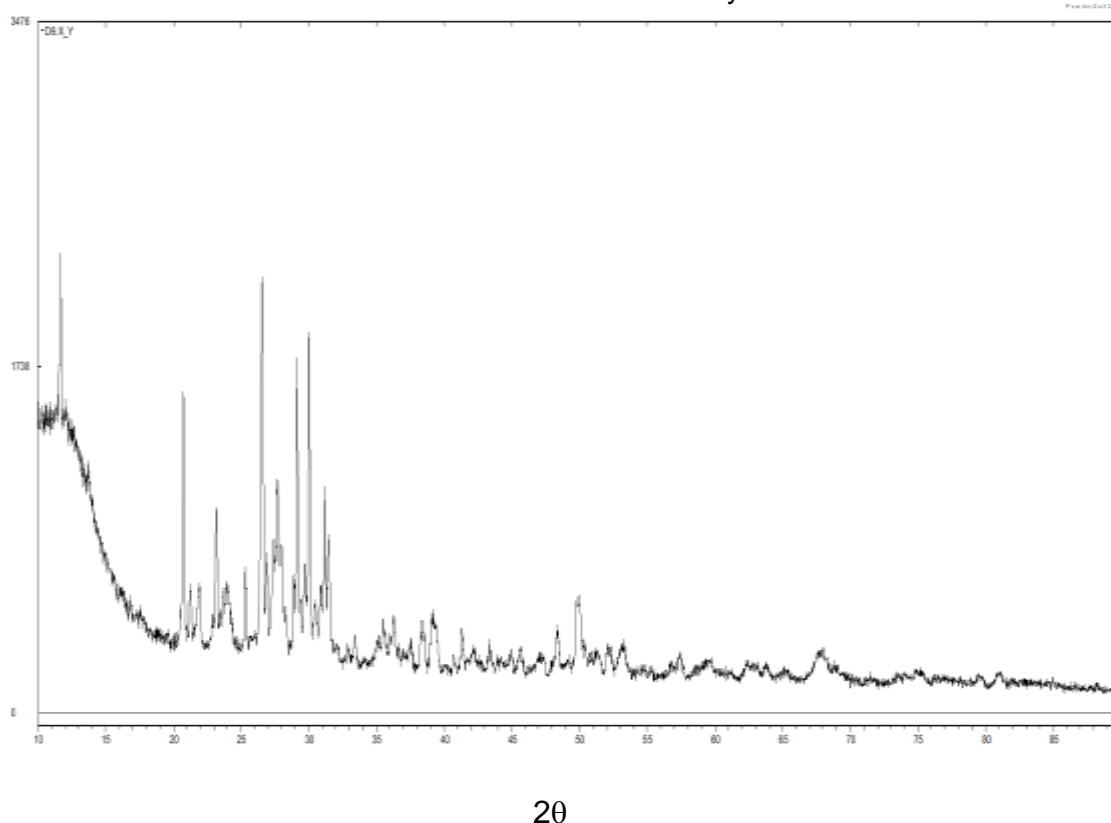
PRUEBA N°9.

Mineral Macusani: 10 gramos + Ca_2SO_4 : 8 gramos + NaCO_3 : 4 gramos

Se recibió el difractograma DRX de la muestra D10 que es residuo de la Prueba N°9 realizada en Baño de Ultrasonido y se utilizó el Software PowderCell 2.4 para poder visualizar el resultado de la muestra, se puede

observar que la muestra es cristalina y muy parecida a la muestra D09, en la **Figura 44**.

Figura 44. Difractograma DRX de la muestra de residuo D10 de la prueba N°9 realizada en Baño de Ultrasonido con sulfato de calcio y carbonato de sodio.

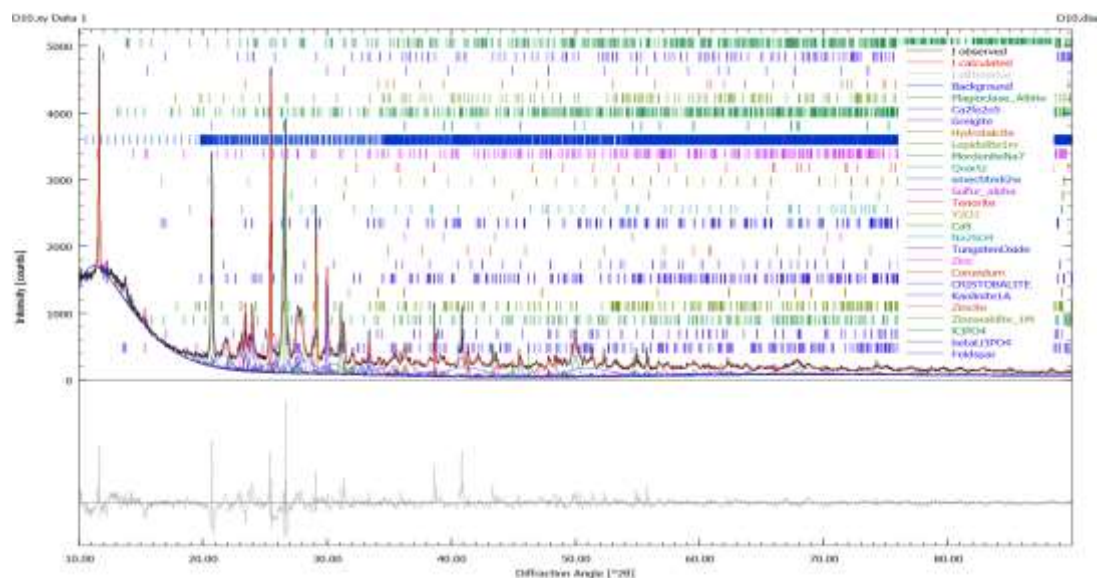


Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso del Software PROFEX, en el cual se puede observar que existen una cantidad similar de minerales presentes en la toba volcánica original y otros más, la cantidad de minerales de litio se muestra en la hoja de resultados del análisis por DRX, tal como se puede observar en la **Figura 45** y en la **Tabla N°12**.

Se puede observar en la **Tabla N°12** que no hay Lepidolita $K(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$ ni Zinnwaldite $\text{KLiFe}^{2+}\text{Al}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$, y tampoco fosfato de Litio, Li_2PO_4 beta, pero el litio puede estar presente en otro tipo de minerales presentes en el residuo de las muestras obtenidas en equipo de Baños de Ultrasonido.

Figura 45. Análisis del Difractograma DRX de la muestra D10 en PROFEX



Fuente: Elaboración propia

Tabla N°12. Reporte de refinamiento en el Software PROFEX de la muestra D10.

Chemical Composition		
	Quantity Goal	Phase Quantity (wt-%)
CRISTOBALITE	Qcristobalite	22.00
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	Qca2fe2o5	1.27
CaS	QCaS	0.24
Corundum	QCorundum	9.00
Feldspar	QFeldspar	1.53
Greigite	Qgreigite	14.00
Hydrotalcite	Qhydrotalcite	1.45
K ₃ PO ₄	QK3PO4	3.30
Kaolinite1A	QKaolinite1A	1.52
Lepidolite1m	QLepidolite1m	0.00
MordeniteNa7	QMordeniteNa7	2.50
Na ₂ SO ₄	QNa2SO4	1.36
Plagioclase_Albite	Qalbite	2.70
Quartz	Qquartz	27.00
Sulfur_alpha	Qsulfur	4.40
Tenonite	Qtenonite	0.22
TungstenOxide	QTungstenOxide	0.73
Y ₂ O ₃	Qy2o3	0.28
Zinc	QZinc	0.28
Zincite	Qzincite	0.51
Zinnwaldite_1M	Qzinnwaldite	0.00
betaLi3PO4	QbetaLi3PO4	0.00
smectitedi2w	Qsmectitedi2w	5.00
Weighted total		99.29

Fuente: Elaboración propia

4.3 Análisis de los resultados de Difracción de Rayos X.

La comparación de los porcentajes de peso de los minerales presentes en las muestras, luego de todo el proceso metalúrgico se presentan en la **Tabla N° 13**. Como se puede observar la fase mineral de litio que se retiró de la muestra N°7 fue la Lepidolita, mientras que la fase Zinnwaldita está aún presente en los residuos. Sin embargo, en las pruebas N° 8 y 9 se puede observar que la Zinnwaldita si es removida al 100% pero además se tiene un mayor número de minerales presentes, muchos ellos de transición. Lo cual, puede ser producto de la lixiviación a una temperatura de 60°C. Por otro lado, a diferencia de la Prueba N°8, la Prueba N°9 no presente en sus residuos la presencia de Fosfato de Litio en la fase beta.

Tabla N°13. Comparación de % peso de la muestra original de toba volcánica con los residuos de pruebas.

Fase	Cantidad de la fase (peso-%)			
	D11	D08	D09	D10
Cristobalite	3.4	2.6	14.5	22
Feldspar	5.8	6.3	0.45	1.53
Kaolinite1A	4.53	5.8	1.22	1.52
Lepidolite1m	12.2	0	0	0
MordeniteNa7	18.2	24.1	3.2	2.5
Plagioclase_Albite	18.4	23.7	4.03	2.7
Quartz	23.3	16.6	16.6	27
Zinnwaldite1M	1.11	2.32	0	0
Smectitedi2w	13.1	17.2	14.3	5
Ca2Fe2O5			2.09	1.27
CaS			0.22	0.24
Corundum			9	9
Greigite			19	14
Hydrotalcite			1	1.45
K3PO4			4.44	3.3
Sulfur_alpha			4.4	4.4
Tenorite			0.46	0.22
TungstenOxide			0.56	0.73
Y2O3			0.32	0.28
Zinc			0.12	0.28
Zincite			0.5	0.51
Beta Li3PO4			2.64	0
Na2SO4	0	1.32	1.35	1.36
Peso Total	100.04	99.94	100.4	99.29

Fuente: Elaboración propia

4.4 Análisis de los resultados de las pruebas de lixiviación

Se puede observar en la **Tabla N°14** los resultados obtenidos de las pruebas de lixiviación y que fueron analizadas por Espectrometría por Absorción Atómica.

RESULTADOS DE ANALISIS DE ABSORCION ATOMICA

Tabla N°14. Resultado de Análisis por Absorción Atómica de Soluciones Lixiviadas

Muestras lixiviadas	Plancha	Manta Calentadora	Baño ultrasónico	Li (mg/L)
10 gr muestra litio + 2gr CaCO_3	✓			5.10
10 gr muestra litio + 2gr Na_2CO_3	✓			5.50
10 gr muestra litio + 2gr Na_2SO_4	✓			137.10
10 gr muestra litio + 2gr CaSO_4	✓			6.10
10 gr muestra litio + 2gr Na_2CO_3 + 4gr CaSO_4	✓			127.40
10 gr muestra litio + 2gr CaCO_3 + 4gr Na_2SO_4	✓			122.70
10 gr muestra litio + 4gr Na_2SO_4		✓		901.15
10 gr muestra litio + 4gr CaCO_3 + 8gr Na_2SO_4			✓	660.34
10 gr muestra litio + 4gr Na_2CO_3 + 8gr CaSO_4			✓	693.37

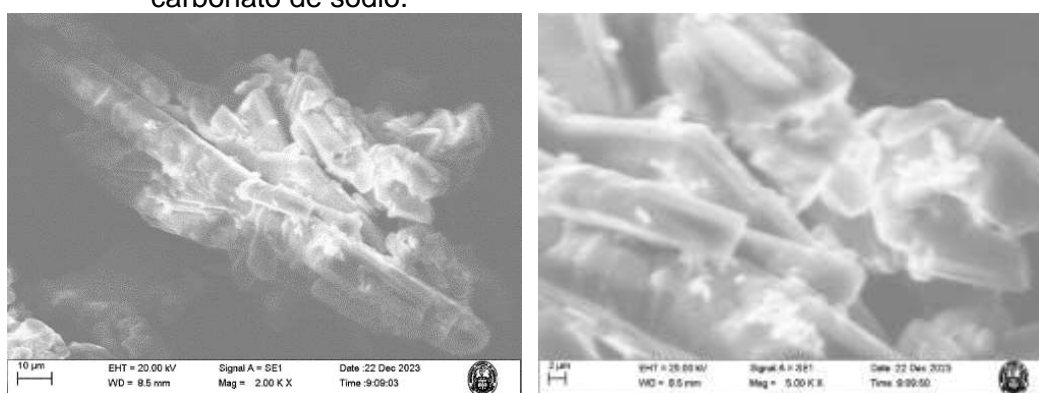
Fuente: Elaboración propia

Tal como se observa, la muestra lixiviada con mayor contenido de Li es la que tuvo como reactante al Na_2SO_4 en la etapa de tostación y además la lixiviación que fue realizada con manta calentadora con agitador magnético tiene la mayor extracción de litio que fue de 901.15 mg/L, mientras que en la lixiviación en Baño de Ultrasonido se obtuvieron valores de 660.34 mg/L y 693.37 mg/L, siendo menores al de la Manta Calentadora. La que se obtuvo menor extracción de litio con un valor de 137.1 mg/L habiéndose empleado sulfato de sodio fue en Plancha de Calentamiento con Agitación Magnética. Por lo tanto, se recomienda realizar las pruebas de extracción de litio empleando Manta Calentadora con Agitación Magnética y con sulfato de sodio a la temperatura de 85°C y por 60 minutos.

4.5 Resultados de análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), del carbonato de litio

Se puede observar en la **Figura 46** las partículas de carbonato de litio con magnificación de 2.00kX y 5.00 kX y que tienen una morfología en forma de varillas. Es decir, se logró obtener el objetivo principal del presente proyecto de investigación, que fue la preparación de carbonato de litio utilizando rocas de tobas volcánicas de la región Puno.

Figura 46. Análisis por SEM del carbonato de litio formado con la adición de carbonato de sodio.



Fuente: Elaboración propia

4.6 Validación de Hipótesis

Para la Hipótesis general de la presente tesis, tal como se muestra en la **Figura 46**, se obtuvo carbonato de litio a partir de mineral de rocas de Tobas volcánicas de la Región de Puno, por proceso hidrometalúrgico, previa tostación con el uso de reactante y agua destilada.

Para nuestras hipótesis específicas podemos decir:

- En la **Tabla N°14**, se valida que se obtuvo soluciones lixiviadas con diferente concentración de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno, según el esquema de procedimiento experimental que se mostró en la **Figura 13**.
- Así mismo, se valida que se obtuvo soluciones lixiviadas con diferente concentración de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno, según el esquema de procedimiento

experimental que se mostró en la **Figura 13** y haciendo una variación en los reactantes y los métodos de lixiviar en laboratorio.

- Se valida, que con las soluciones lixiviadas con contenido de Litio que se obtuvieron según el procedimiento experimental planteado, al adicionar carbonato de sodio hasta un pH de 9.4 y pasando por un calentamiento y agitación por 60 minutos se obtuvo un precipitado que luego de ser secado y ser llevado a análisis SEM (**ver Figura 46**) se verificó que se obtiene carbonato de litio.

CONCLUSIONES

1. Se concluye, a través del análisis por difracción de Rayos-X, que las rocas de las tobas volcánicas poseen contenido de litio, en las especies minerales de Lepidolita y Zinnwaldita (también llamada Litionita).
2. Se concluye, que a través de los procesos de: chancado, tostación con los reactantes a 900 °C por una hora, lixiviación con agua destilada a temperatura mayor de 60°C por una hora y adición de carbonato de sodio a la solución rica a 45°C por 60 minutos, se obtiene un precipitado que al ser secado y analizado se confirma que es Carbonato de Litio con una morfología en forma de varillas.
3. Se concluye que el mejor escenario de recuperación de carbonato de litio se obtiene al realizar la prueba con sulfato de sodio, Na_2SO_4 , con el doble de reactante (4 gramos), la lixiviación con agua destilada a 85°C por 60 minutos en manta calentadora y con agitador magnético, se obtuvo un valor alto de 901.15 mg/L de litio. Valor que es más de seis veces el obtenido con solo 2 gramos de reactante y realizando la lixiviación con plancha calentadora.
4. Se concluye que la lixiviación con equipo de ultrasonido a una temperatura de 60°C, y con los reactantes: 4gr CaCO_3 + 8gr Na_2SO_4 logra retirar a la Zinnwaldita, sin embargo, se observa la presencia de fosfato de Litio.
5. Se concluye que la lixiviación con equipo de ultrasonido a una temperatura de 60°C, y con los reactantes: 4gr Na_2CO_3 + 8gr CaSO_4 logra retirar a la Zinnwaldita y no se evidencia presencia de Fosfato de Litio u otro mineral de Litio.
6. Finalmente, se concluye que la hipótesis general planteada fue validada, dado que, a partir del mineral de tobas volcánicas de la región Puno se obtuvo la solución rica de lixiviación con la que se logró preparar carbonato de litio empleando carbonato de sodio a 45°C por 60 minutos, con una morfología en forma de varillas.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda evaluar un esquema de obtención de carbonato de litio a partir de los residuos obtenidos del proceso evaluado en este presente trabajo que tuvo como reactante el sulfato de sodio, con un enfoque de tratamiento hacia la Zinnwaldita (también llamada Litionita).
2. Se recomienda en pruebas de lixiviación a agitación y temperatura, evaluar el proceso con el uso de una manta calentadora con agitación magnética, puesto que en el presente estudio otorgó una diferenciación alta y puede ser muy determinativa al escalar los resultados para la viabilidad de un proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alatorre, A. E. & Santillán, Y. (2019). YACIMIENTO DE LITIO. *Geomimet*.
NOVIEMBRE/DICIEMBRE 2020 N°348.17-20.
https://www.revistageomimet.mx/wp-content/uploads/2020/12/G_348.pdf
- Alvarez Juarez, Z. (2022). Proceso hidrometalúrgico de purificación y concentración de litio a partir de soluciones lixiviados provenientes del yacimiento Macusani Puno. <https://repositorio.unap.edu.pe:20.500.14082/18018>.
- Bradley, D.C., Munk, LeeAnn, Jochens, Hillary, Hynek, Scott, and Labay, Keith. (2013). A preliminary deposit model for lithium brines: U.S. Geological Survey OpenFile Report 2013–1006, (página 6)
<http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20131006>.
- Chamay, R. (2019). Recuperación metalúrgica de un yacimiento de litio para su comercialización - Puno - 2019 (Trabajo de investigación). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/23526>.
- Comisión Chilena del Cobre. (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030*.
<https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Produccion%20y%20consumo%20de%20litio%20hacia%20el%202030.pdf>
- Crocker L, Lien RH, May JT, Witkowsky DS, Seidel DC. (1988) Lithium and its recovery from low-grade Nevada clays. Bureau of Mines, US Department of the Interior, Bulletin 691.
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12832/m2/1/high_res_d/Bulletin0691.pdf
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2014). Elements of X-ray Diffraction, Third Edition. Pearson Education Limited. (pp. 105-106). ISBN 10: 1-292-04054-8.
[https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20\(2014\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20(2014).pdf)
- Dana H. (1959) Manual de Mineralogía (2ª ed.) México: Reverté S.A. (pp. 437,438, 470, 471 y 501).
- Departamento de Ingeniería Metalúrgica – Universidad de Santiago de Chile. (s.f.) Anotaciones universitarias: Capítulo 14: Hidrometalurgia.
<https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/documentos/capitulo14.pdf>

- Dessemond, Colin. (2019) Spodumene: The Lithium market, resources and processes. *Minerals*, vol.9, no. 7, (pp. 428). DOI: 10.3390/min9070428
- Dill, H. G. (2015). Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews*, 69, (pp. 417–561). DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.02.02
- DRA PACIFIC. FALCHANI LITHIUM PROJECT. (2024). NI 43-101 TECHNICAL REPORT PRELIMINARY ECONOMIC ASSESSMENT – UPDATE. <https://americanlithiumcorp.com/wp-content/uploads/2024/02/GPERPPR7027-Falchani-Update-of-PEA-Final-Report-22022024.pdf>
- El-Mallakn, R.S. (1990). Lithium. *Connecticut Medicine*, v. 54, no. 3. (pp. 115–126). PMID: 2182284.
- Hancoo Quispe, O. C. (2022). Caracterización de rocas volcánicas para determinar la ocurrencia del litio en la concesión Falchani-Corani-Puno. <https://repositorio.unap.edu.pe:20.500.14082/18943>
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6ta ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-1-4562-2396-0
- Litio. (s.f.) Lenntech B.V. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/li.htm>
- Marcinov, V., Klimko, J., Takáčová, Z., Pirošková, J., Miškuřová, A., Sommerfeld, M., ... & Oráč, D. (2023). Lithium production and recovery methods: Overview of lithium losses. *Metals*, 13(7), 1213. <https://doi.org/10.3390/met13071213>
- Martí Moscoso, J. M. (2019). Estudio comparativo de yacimientos de litio de Chile, Bolivia, Argentina y Perú. [Tesis de grado, Universidad de las Américas (Chile)]. Repositorio UDLA (Chile). <http://repositorio.udla.cl/xmlui/handle/udla/208>.
- Munk, L.A., Hynek, S.A., Bradley, D.C., Boutt, D.F., Labay, K., and Jochens, H. (2016). Lithium brines—A global perspective: Reviews in Economic Geology, v. 18, (p. 339–365). <https://doi.org/10.5382/Rev.18.14>
- Nina Gonzales, M. R. (2022). Extracción de litio por lixiviación con fluoruro sodio y ácido sulfúrico en autoclave a partir de mineral de litio en roca Yacimiento Falchani Macusani - Puno. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18020>
- Quille Calizaya, G. (2022). OBTENCIÓN DE CARBONATO DE LITIO MEDIANTE PROCESO DE LIXIVIACIÓN, CONCENTRACIÓN, EVAPORACIÓN Y

- PRECIPITACIÓN. Revista de Investigaciones, 11(2), 79-93.
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18310>
- Sánchez, M. C., Aguirre, J. P., & Gómez, C. A. (2021). Regulación del litio: oportunidades y desafíos en la actividad minera.
https://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/bitstream/handle/123456789/5273/TA_27.pdf
- Spellman, F. (2024). *The Science of Lithium: Introduction*. Boca Raton: CRC Press, 2024. (pp. 3-9, 21-40). ISBN9781003387879. DOI:10.1201/9781003387879.
- Stillings, L.L., & Morissette, C.L. (2012). Lithium clays in sediments from closed-basin, evaporative lakes in the Southwestern United States: Abstracts with Programs—Geological Society of America, v. 44, no. 7, (p. 210).
- Tam Tran & Van T. Luong. (2015). Chapter 3 - Lithium Production Processes. Editor(s): Alexandre Chagnes, Jolanta Światowska. Lithium Process Chemistry, Elsevier. Pages 81-124. ISBN 9780128014172. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00003-7>
- Tuff. (15/08/2023). Geology Science.
<https://es.geologyscience.com/rocks/tuff/?amp>
- Uceda, D.A. (2021). Hidrometalurgia química e ingeniería. Instituto de Ingenieros de Minas. (pp. 42-44). <https://iimp.org.pe/archivos/publicaciones/a621-20210824-062743-1552.pdf>
- Ul-Hamid, A. (2018). A beginners' guide to scanning electron microscopy (Vol. 1, p. 402). Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-98481-0. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98482-7>
- USGS (2017). Lithium, professional paper 1802-K. Reston, VA, United States Geological Survey. (pp. K6-K12). ISSN 2330-7102. DOI: <https://doi.org/10.3133/pp1802K>
- Vásquez Cordano, A. (2018). El Mercado del Litio y la Revolución de las Energías Renovables. <https://hdl.handle.net/20.500.12877/44>
- Velasco Velarde, A. (2019). Recuperación de carbonato de litio de las salmueras residuales provenientes de las piscinas de evaporación de la COMIBOL. [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio UMSA. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/32446>
- Villa Canaviri, G. (2023). Obtención de Salmuera Concentrada en Litio mediante electrodiálisis a partir de Salmueras de Silvinita provenientes del Salar de

- Uyuni. [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio UMSA. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/34909>
- Yan QX, Li XH, Wang ZX, Wang JX, Guo HJ, Hu QY, et al. (2012). Extraction of lithium from lepidolite using chlorination roastingewater leaching process. Trans Nonferrous Met Soc China 2012;22(7). [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61383-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61383-6)
- Zapana Yanarico, R. (2020). Extracción de litio por diferentes métodos de lixiviación en tobas volcánicas del depósito Falchani de Macusani – región Puno, 2018. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/13944>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia	99
Anexo 2: Resultados de laboratorio espectrometría	100
Anexo 3: Otros	102
Anexo 4: Curriculum Vitae (español e inglés).....	103

Anexo 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	DISEÑO METODOLOGICO
<p><u>Problema general</u> ¿Puede disminuir el requerimiento mundial de energías de fuentes fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural y así disminuir las emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero?</p> <p><u>Problemas específicos</u> 1. ¿Puede un proceso metalúrgico extraer Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno, siendo esta fuente mineral poco tratada a nivel mundial? 2. ¿Puede variarse los reactantes del proceso metalúrgico de extracción de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno, y evidenciar con cuál se obtiene mayor eficiencia? 3. ¿Puede obtenerse carbonato de litio a partir de tobas volcánicas como única fuente de recursos de Litio descubierta hasta el momento para la Región Puno y el Perú?</p>	<p><u>Objetivo general</u> Estudiar la obtención carbonato de litio mediante proceso de chancado, tostación y lixiviación de rocas de tobas volcánicas de la región Puno.</p> <p><u>Objetivos específicos</u> 1. Realizar pruebas de chancado de muestra, caracterización mineralógica de la muestra por: Difracción de Rayos X, Fluorescencia de rayos-X y Microscopía Electrónica de Barrido. Pruebas pirometalúrgicas de tostación, pruebas hidrometalúrgicas de lixiviación para extraer el litio. Y finalmente, analizar la solución lixiviada para evidenciar la concentración de Litio a través de absorción atómica. 2. Realizar pruebas de chancado, tostación, pruebas hidrometalúrgicas de lixiviación para extraer el litio, variando los reactantes y los métodos de lixiviar en laboratorio. Y finalmente, analizar la solución lixiviada de cada experiencia para evidenciar la variación de concentración de Litio a través de absorción atómica y obtener la eficiencia por cada una de las experiencias. 3. Realizar pruebas de chancado, tostación, lixiviación al mineral de tobas volcánicas de la Región Puno y finalmente con la solución lixiviada obtener carbonato de litio.</p>	<p><u>Hipótesis general</u> Se obtiene carbonato de litio por proceso hidrometalúrgico, previa tostación con el uso de reactante y agua destilada.</p> <p><u>Hipótesis específicas</u> 1. Se obtiene solución lixiviada de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno luego de un procesamiento de chancado, tostado y lixiviación. 2. Se obtiene soluciones lixiviadas con diferente concentración de Litio a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno luego de un procesamiento de chancado, tostado y lixiviación, variando los reactantes y los métodos de lixiviar en laboratorio. 3. Se obtiene carbonato de Litio a partir de solución lixiviada obtenida a partir de mineral de tobas volcánicas de la región Puno luego de un procesamiento de chancado, tostado y lixiviación.</p>	<p><u>Variable independiente: X</u> X1: Presencial de litio en las tobas volcánicas de mineral Falchani de la región de Puno. X2: Reactivos con antecedentes de obtención de Li.</p> <p><u>Variable dependiente: Y</u> Y1: mg/L de Litio obtenidos en la solución de lixiviación. Y2: morfología de las partículas de carbonato de Litio obtenidas.</p>	<p><u>Indicadores de X:</u> X1: Caracterización por DRX. X2: Uso de reactantes para el proceso de tostación.</p> <p><u>Indicadores de Y:</u> Y1: Análisis por absorción atómica de solución luego de lixiviación. Y2: Análisis de muestra final por microscopía electrónica de barrido (SEM).</p>	<p><u>Tipo de Investigación</u> Experimental</p> <p><u>Alcances de Investigación</u> Exploratorio y explicativo</p> <p><u>Nivel de Investigación</u> Aplicativo</p> <p><u>Diseño de la Investigación</u> Cuantitativo</p> <p><u>Población</u> 9 muestras</p> <p><u>Instrumento</u> Pruebas de laboratorio.</p>

Anexo 2: Resultados de laboratorio espectrometría



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Laboratorio de Espectrometría

ANALISIS DE 6 SOLUCIONES POR Litio

APOYO INVESTIGACIÓN : ORFELINDA AVALO CORTEZ

Recepción de muestras : Lima, 8 de Noviembre del 2023

RESULTADO DEL ANALISIS DE SOLUCIONES

Código	Li(mg/L)
A-1	5.1
A-2	5.5
A-3	137.1
A-4	6.1
A-5	127.4
A-6	122.7

Método utilizado: Espectrometría de absorción atómica

Lima, 15 de Noviembre del 2023



MSC. Atilio Mendoza Apolaya

Jefe Lab. ESPECTROMETRÍA

Av. Túpac Amará N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú

Teléfono: (511) 4824427, Central Telefónica (511) 4811070, Anexo 4245

e-mail: labespectro@uni.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Laboratorio de Espectrometría

ANALISIS DE 10 SOLUCIONES

ATENCIÓN : ORFELINDA AVALO CORTEZ

Recepción de muestras : Lima, 6 de Junio del 2024

RESULTADO DEL ANALISIS DE SOLUCIONES

N°	Muestra	Pb(mg/L)
1	H-1	30.750
2	H-2	0.174
3	H-3	0.130
4	H-4	0.104
5	H-5	0.096
6	H-6	0.087
7	H-7	0.104
		Li(mg/L)
8	H-8	901.15
9	H-9	660.34
10	H-10	693.37

Método utilizado: Espectrometría de absorción atómica

Lima, 12 de Junio del 2024


 MSc. Atilio Mendoza A.
 Jefe Lab. ESPECTROMETRÍA

Av. Túpac Amará N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú

Teléfono: (511) 4824427 , Central Telefónica (511) 4811070, Anexo 4245

e-mail: labespectro@uni.edu.pe

Anexo 3



Ley N°30035
Respositorio Nacional Digital



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
INGENIERIA**

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA EN EL PORTAL DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNI

1. DATOS PERSONALES

Apellidos y nombres: Portilla Flores, Katherine

D.N.I: 72885208

Teléfono casa: - celular: 993 687 126

Correos electrónicos: kportillaf@uni.pe / Katherine.pf.4@hotmail.com

2. DATOS ACADÉMICOS

Grado académico: Bachiller

Mención: Ingeniería Metalúrgica

3. DATOS DE LA TESIS

Título: "OBTENCIÓN DE CARBONATO DE LITIO A TRAVÉS DE LIXIVACIÓN DEL MINERAL DE ROCAS DE TOBAS VOLCANICAS DE LA REGIÓN PUNO"

Año de publicación: 2024

A través del presente, autorizo a la Biblioteca Central de la Universidad Nacional de Ingeniería, la publicación electrónica a texto completo en el Repositorio Institucional, el citado título.

Firma:

Fecha de recepción: 11/03/2025

Anexo 4: Curriculum Vitae

DATOS PERSONALES

Nombre: **Katherine Portilla Flores**
 DNI: 72885208
 Brevete: Q72885208
 Fecha de Nacimiento: 1992/04/30.
 Teléfonos celulares: 993687126/ 955610744
 Correo electrónico: katherine_pf_4@hotmail.com
 kportillaf@uni.pe



PERFIL PROFESIONAL

Ingeniera Metalúrgica colegiada que se desempeña en el Área de Metalurgia realizando el control metalúrgico de insumos y costos en Planta Concentradora Polimetálica. Cuento con más de siete años de experiencia entre labores de Laboratorio Metalúrgico, Control y Análisis y Supervisión de los Procesos en Planta Concentradora Polimetálica. Además, estoy en constante desarrollo de mis habilidades de gestión, capacidad de liderazgo, orientación hacia resultados y objetivos, trabajo bajo presión con la búsqueda de soluciones y trabajo en equipo.

FORMACIÓN ACADÉMICA

Octubre 2021 – mayo 2024 **Maestría**
 UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICAS (UPC).
 Maestría en Gestión Minera.

Agosto 2019 – agosto 2021 **Maestría**
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA. FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA (FIGMM- UNI). Especialidad de Ing. Metalúrgica. Tesis en desarrollo como parte del Proyecto de Investigación FIGMM- UNI 2023.

2011 - 2015

Pregrado

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA. FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA (FIGMM- UNI). Especialidad de Ing. Metalúrgica.

Mérito: diez de veintinueve.

Agosto 2014 – enero 2015

Diplomado

DIPLOMADO DE LIDERAZGO PARA LA TRANSFORMACIÓN 2014. INSTITUTO DE GOBIERNO Y DE GESTIÓN PÚBLICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN MARTÍN DE PORRES. Alumna destacada y parte del equipo del Proyecto de Gobernabilidad finalista en la Sede Sur-Villa El Salvador.

EXPERIENCIA PROFESIONAL

Agosto 2022 – Actualidad

Empresa Administradora CERRO S.A.C.

Jefe de Guardia. Planta Concentradora Paragsha-San Expedito.

Agosto 2020 – Julio 2022

Empresa Administradora CERRO S.A.C.

Analista de Procesos Industriales. Planta Concentradora Paragsha - San Expedito.

Mayo 2018 – Julio 2020

Empresa Administradora CERRO S.A.C.

Metalurgista Junior. Planta Concentradora Paragsha - San Expedito.

Diciembre 2017 – abril 2018

Empresa Administradora CERRO S.A.C.

Operador de Planta I. Planta Concentradora Paragsha - San Expedito.

2017 (Julio - noviembre)

SGS del Perú S.A.

Operador de Procesos en Minera Antapaccay – Región Cusco.

2016 (Setiembre - diciembre)

SGS del Perú S.A.

Operador de Procesos en Minera Chinalco Perú – Región Junín.

2016 (Febrero – Agosto)

Reactivos Nacionales S.A.

Practicante del Laboratorio Químico Metalúrgico – Región Callao.

CURSOS

➤ **DIPLOMADO EN PROCESAMIENTO DE MINERALES Y GEOMETALÚRGIA.**

Colegio de Ingenieros – AMV Consultores. En curso, inicio: Mayo 2024.

➤ **CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN “GESTIÓN POR PROCESOS Y MEJORA CONTINUA”,** Online, 16 de mayo al 27 de junio del 2021. **CENTRO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y DE COMUNICACIONES. CTIC - UNI**

➤ **DIPLOMADO INTERNACIONAL EN GESTION AMBIENTAL EN MINERÍA.** 120 horas lectivas, culminadas el 26 de julio del 2020. CAMIPER ESCUELA DE ALTOS ESTUDIOS.

➤ Programa de Habilidades Personales (**DHAPER**) 2020. Escuela de Postgrado **GERENS.**

➤ **FUNDAMENTO DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS.** Graduate Business School **CENTRUM-PUCP.** Junio 2019.

➤ **GEOMETALURGIA INTEGRAL EN EL PROCESAMIENTO DE MINERALES.** Trujillo, 2 EN 6 y 27 de mayo del 2018. Colegio de Ingenieros – AMV Consultores.

➤ **DISEÑO EXPERIMENTAL METALURGICO.** Trujillo, 27 de enero del 2018. Colegio de Ingenieros – AMV Consultores.

➤ **"Data Analytics for Lean Six Sigma por Universidad de Ámsterdam** en Coursera. Certificado obtenido el Sunday, December 17, 2017 5:07 AM GMT".

➤ **MOLIENDA SAG CON APLICACIONES MOLYCOP TOOLS.** Lima, del 02 al 04 de noviembre del 2017. InterMet Consultores Metalúrgicos.

- **ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PROCESOS USANDO MINITAB.** Lima, del 09 al 11 de septiembre del 2015. InterMet Consultores Metalúrgicos.

EVENTOS ACADÉMICOS DESTACADOS

- XIV CONIMEMT - HUACHO 2015. Ponente del trabajo preliminar: CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE CUARZO Y EL WORK INDEX DE BOND EN MOLINO DE BOLAS, desarrollado en la UNI para la Feria de Proyectos 2015 I con el equipo del curso de Diseño de Plantas- Proyecto ganador.

OTROS CONOCIMIENTOS

IDIOMAS

- INGLÉS: Nivel Avanzado, Asociación Cultural Peruana Británica – Británico.

TECNOLÓGICOS

- Microsoft Windows:
- Excel. Nivel Avanzado. (CIBERTEC 2020)
- Power Bi, Word y Power Point. Nivel Intermedio
- AutoCAD: Nivel Intermedio.
- Manejo de SAP. Taller de Especialización en SISTEMAS UNI.
- Programas relacionados a la carrera: Minitab, MolyCop Tools, Metsim, JKSimMet y Modsim Nivel Intermedio-Usuario.

Curriculum Vitae

PERSONAL DATA

Name: **Katherine Portilla Flores**
DNI: 72885208
License: Q72885208
Date of Birth: 1992/04/30.
Phone: +51 993687126/ +51 955610744
Email: katherine_pf_4@hotmail.com
kportillaf@uni.pe



PROFESSIONAL PROFILE

A certified Metallurgical Engineer with over seven years of experience in the Metallurgical sector, specializing in metallurgical control, process supervision, and cost management at a Polymetallic Concentration Plant. I possess strong skills in laboratory analysis, process supervision, and team leadership. My strengths include effective management, problem-solving under pressure, and a strong orientation toward achieving results and objectives. I thrive in collaborative environments and am continuously developing my leadership capabilities.

ACADEMIC TRAINING

MASTER'S DEGREE IN MINING MANAGEMENT

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) | October 2021 – May 2024
(Expected).

MASTER'S DEGREE IN METALLURGICAL ENGINEERING

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica (FIGMM-UNI) | August 2019 – August 2021
Thesis in progress as part of the FIGMM-UNI Research Project, 2023

BACHELOR'S DEGREE IN METALLURGICAL ENGINEERING

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Facultad de Ingeniería Geológica

Minera y Metalúrgica (FIGMM-UNI) | 2011 – 2015
Graduated with Merit: 10th out of 29 students

DIPLOMA IN LEADERSHIP FOR TRANSFORMATION

Instituto de Gobierno y de Gestión Pública de la Universidad de San Martín de Porres | August 2014 – January 2015
Outstanding student and finalist in the Governance Project at the South Campus-Villa El Salvador

PROFESSIONAL EXPERIENCE

Guard Chief, Concentrator Plant Paragsha-San Expedito.

Empresa Administradora CERRO S.A.C. | August 2022 – Present

Industrial Process Analyst, Concentrator Plant Paragsha-San Expedito.

Empresa Administradora CERRO S.A.C. | August 2020 – July 2022

Junior Metallurgist, Concentrator Plant Paragsha-San Expedito.

Empresa Administradora CERRO S.A.C. | May 2018 – July 2020

Plant Operator I, Concentrator Plant Paragsha-San Expedito.

Empresa Administradora CERRO S.A.C. | December 2017 – April 2018

Process Operator, Minera Antapaccay – Cusco Region

SGS del Perú S.A. | July 2017 – November 2017

Process Operator, Minera Chinalco Perú – Junin Region

SGS del Perú S.A. | September 2016 – December 2016

Intern, Chemical Metallurgical Laboratory

Reactivos Nacionales S.A. | February 2016 – August 2016

COURSES AND CERTIFICATIONS

- **DIPLOMA IN MINERAL PROCESSING AND GEOMETALLURGY.** College of Engineers – AMV Consultants. In progress, start: May 2024.
- **SPECIALIZATION COURSE IN “PROCESS MANAGEMENT AND CONTINUOUS IMPROVEMENT”,** Online, May 16 to June 27, 2021. CENTER FOR INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGIES. **CTIC – UNI**
- **INTERNATIONAL DIPLOMA IN ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN MINING.** 120 teaching hours, completed on July 26, 2020. CAMIPER SCHOOL OF HIGHER STUDIES. **CAMIPER**
- Personal Skills Program (**DHAPER**) 2020. Postgraduate School - **GERENS**
- **PROJECT EVALUATION FUNDAMENTALS.** Graduate Business School **CENTRUM-PUCP.** June 2019.
- **INTEGRAL GEOMETALLURGY IN MINERAL PROCESSING.** Trujillo, 26 and 27 May 2018. College of Engineers – **AMV Consultants.**
- **METALLURGICAL EXPERIMENTAL DESIGN.** Trujillo, January 27, 2018. College of Engineers – **AMV Consultants.**
- **Data Analytics for Lean Six Sigma** by University of Amsterdam on Coursera. Certificate obtained on Sunday, December 17, 2017, 5:07 AM GMT".
- **Workplace Safety Training;** including IPERC, first aid, firefighting, lockout and tagging, work at height and work in confined areas.
- **SAG GRINDING WITH MOLYCOP TOOLS APPLICATIONS.** Lima, November 2-4, 2017. **InterMet Metallurgical Consultants.**
- **STATISTICAL ANALYSIS OF PROCESSES USING MINITAB.** Lima, September 9-11, 2015. **InterMet Metallurgical Consultants.**

HIGHLIGHTED ACADEMIC EVENTS

- **XIV CONIMEMT - HUACHO 2015.** Speaker of the preliminary work: CORRELATION BETWEEN QUARTZ CONTENT AND BOND WORK INDEX IN BALL MILL, developed at UNI for the 2015 Project Fair I with the Plant Design course team - Winning project.

OTHER KNOWLEDGE

LANGUAGES

- ENGLISH: Advanced Level, British Peruvian Cultural Association - British.

TECHNOLOGICAL SKILLS

- **Microsoft Windows:**
 - Excel. Advanced Level. (CIBERTEC 2020)
 - Power Bi, Word and Power Point. Intermediate Level
- AutoCAD: Intermediate Level.
- SAP Management. Specialization Workshop in UNI SYSTEMS.
- **Programs related to the career:** Minitab, MolyCop Tools, Metsim, JKSImMet and Modsim Intermediate-User Level.