



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



## “ESTUDIO CINÉTICO DE LA MOLIENDA Y CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN MINERALOGÍA Y QUÍMICA DEL MINERAL DE LITIO DE MACUSANI – PUNO”

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**BRANDON DYLAN PINTO MAMANI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



## Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ESTUDIO CINÉTICO DE LA MOLIENDA Y  
CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN  
MINERALOGÍA Y QUÍMICA DEL MINER  
A**

AUTOR

**BRANDON DYLAN PINTO MAMANI**

RECuento de palabras

**25292 Words**

RECuento de caracteres

**128015 Characters**

RECuento de páginas

**140 Pages**

Tamaño del archivo

**22.6MB**

Fecha de entrega

**Apr 10, 2024 8:10 AM GMT-5**

Fecha del informe

**Apr 10, 2024 8:12 AM GMT-5**

### ● 15% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 14% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados
- 5% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)

  
M. Sc. Marleni Yovanna Valencia Pacho



  
D. Sc. German Quille Calizaya  
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
FJQ UNA - PUNO

Resumen



## DEDICATORIA

*Este trabajo va dedicado a dios, mi madre Marcelina Olga, mi padre Walter Remigio, Y mis abuelas Ofelia y Valeriana, a mis hermanos Stacy, Remington y toda mi familia, a la vez va dedicado a todos mis docentes y mentores de la Facultad de Ingeniería Química, a la Universidad Nacional del Altiplano donde me pude formar como un profesional y a mis Jefes de donde he laborado EMSA PUNO S.A. y AESA Proyecto Regina y amigos que he conocido y sobre todo gracias a Dios por darme salud y guiarme en mi camino.*

***Brandon Dylan Pinto Mamani***



## AGRADECIMIENTOS

*En gratitud a la Universidad Nacional del Altiplano- Puno y la Facultad de Ingeniería Química, a mis queridos Docentes de esta Escuela Profesional por haberme enseñado y guiado para llegar a ser un buen profesional.*

*A mi asesora Marleni Yovanna Valencia Pacho, mis Jurados de tesis Mg. Higinio Alberto Zúñiga Sánchez, M.Sc. Jose Nestor Mamani Quispe y M.Sc. Luz Marina Teves Ponce y a todos los que me guiaron para hacer este trabajo de tesis.*

***Brandon Dylan Pinto Mamani***



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>20</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>24</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA GENERAL .....</b>	<b>25</b>
1.2.1 Planteamiento de problemas específicos.....	25
<b>1.3 HIPÓTESIS GENERAL .....</b>	<b>26</b>
1.3.1 Hipótesis específicas .....	26
<b>1.4 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>26</b>
1.4.1 Objetivos Específicos.....	27
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
<b>2.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2 MARCO TEORICO .....</b>	<b>34</b>
2.2.1 Litio.....	34



2.2.2	Características y propiedades del litio.....	35
2.2.3	Usos del Litio .....	37
2.2.4	Fuentes de Litio.....	41
2.2.5	Forma de Comercialización de Litio e Importancia Económica.....	45
<b>2.3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS .....</b>	<b>45</b>
2.3.1	Dureza .....	46
2.3.1.1	Escala de Mosh.....	47
2.3.2	La densidad Aparente.....	48
2.3.3	Otros aspectos físicos del mineral.....	48
2.3.3.1	Brillo.....	49
2.3.3.2	Color.....	49
2.3.3.3	Color de raya .....	49
2.3.3.4	Granulometría.....	51
<b>2.4</b>	<b>ESPECTROSCOPIA DE PLASMA ICP- OES .....</b>	<b>51</b>
2.4.1	Aplicaciones de las técnicas de ICP-OES .....	54
<b>2.5</b>	<b>DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....</b>	<b>55</b>
2.5.1	Usos de la técnica de (DRX).....	56
<b>2.6</b>	<b>MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....</b>	<b>58</b>
2.6.1	Aplicación es de la Técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) .....	61
<b>2.7</b>	<b>ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) .....</b>	<b>64</b>
2.7.1	Gráficos de los modelos (FTIR).....	68

### CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS



<b>3.1</b>	<b>MATERIALES UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO.....</b>	<b>69</b>
3.1.1	Equipo y materiales.....	69
<b>3.2</b>	<b>RECEPCIÓN DE MUESTRA .....</b>	<b>71</b>
<b>3.3</b>	<b>REQUERIMIENTO DE LAS MUESTRAS PARA LOS ANÁLISIS.....</b>	<b>71</b>
3.3.1	Desinfección de los Equipos a Utilizar .....	72
<b>3.4</b>	<b>REDUCCIÓN DE TAMAÑO.....</b>	<b>72</b>
3.4.1	Reducción de tamaño manual .....	72
3.4.2	Reducción de Tamaño con la Chancadora de Mandíbulas .....	73
3.4.3	Reducción de Tamaño con el Molino de Bolas .....	75
<b>3.5</b>	<b>CUARTEADO.....</b>	<b>77</b>
<b>3.6</b>	<b>REALIZAR EL ESTUDIO CINÉTICO DE LA MOLIENDA DEL MINERAL DE LITIO AJUSTANDO LOS DATOS EXPERIMENTALES AL MODELO CINÉTICO PROPUESTO POR TOVAROV V.V.....</b>	<b>78</b>
3.6.1	Modelo Gaudin Schuhmann.....	79
3.6.2	Modelo Rosin Rammler .....	79
3.6.3	Modelo cinético de Tovarov V.V.....	80
<b>3.7</b>	<b>ANÁLISIS APLICADOS A LA MUESTRA.....</b>	<b>81</b>
3.7.1	Análisis Físicos a la Muestra.....	81
3.7.1.1	Análisis de dureza .....	81
3.7.1.2	Análisis de Color .....	81
3.7.1.3	Análisis de Densidad Aparente .....	82
3.7.1.4	Análisis de la granulometría del tamizado .....	82
3.7.2	Análisis de Espectroscopia de Emisión Atómica (ICP-OES).....	82
3.7.3	Análisis de difracción de rayos X (DRX) .....	83



3.7.4	Análisis de Espectroscopia Infrarroja (FTIR).....	83
3.7.5	Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	83

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1</b>	<b>DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA DEL MINERAL DE LITIO.....</b>	<b>84</b>
4.1.1	Modelo cinético de distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann.....	84
4.1.2	Modelo cinético de distribución de Rosin – Rammner.....	88
4.1.3	Modelo cinético de Tovarov V.V.....	91
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MINERAL DE LITIO DE MACUSANI – PUNO.....</b>	<b>94</b>
4.2.1	Color.....	94
4.2.2	Color de Raya.....	95
4.2.3	Dureza .....	96
4.2.4	Densidad Aparente .....	98
4.2.5	Metodología de granulometría .....	100
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MINERAL DE LITIO DE MACUSANI – PUNO.....</b>	<b>103</b>
4.3.1	Análisis del mineral de litio por Espectroscopía de Emisión Atómica (ICP-OES).....	103
4.3.2	Análisis para la muestra 270-C en (ICP-OES).....	105
<b>4.4</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL MINERAL DE LITIO DE MACUSANI – PUNO .....</b>	<b>108</b>
4.4.1	Análisis de Difracción de Rayos X (DRX).....	109
4.4.2	Análisis del mineral de litio por Espectroscopia Infrarroja (FTIR) .....	113





4.4.3	Análisis del mineral por microscopia electrónica de barrido (SEM)....	116
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>121</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>122</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>128</b>

**Área** : Ingeniería de Procesos

**TEMA:** Estudio cinético de la molienda y caracterización de la composición mineralogía y química del mineral de litio de Macusani – Puno

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 31 de enero del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Propiedades físicas y químicas del litio. ....	36
<b>Tabla 2.</b> Los minerales de litio su nombre y composición química.....	37
<b>Tabla 3.</b> Aplicaciones de los subproductos del Litio en la Industria .....	40
<b>Tabla 4.</b> Principales productores de litio en el 2006 .....	42
<b>Tabla 5.</b> Las diez minas de litio más grandes del mundo .....	43
<b>Tabla 6.</b> Producción Mundial de litio Toneladas Métricas .....	44
<b>Tabla 7.</b> Escala de Mosh .....	47
<b>Tabla 8.</b> Densidad de alguno elemento .....	48
<b>Tabla 9.</b> Longitud de onda para distintos rangos en el infrarrojo .....	67
<b>Tabla 10.</b> Código de muestra de litio .....	71
<b>Tabla 11.</b> Tiempo de la muestra molida.....	76
<b>Tabla 12.</b> Resultados después del rifleado .....	78
<b>Tabla 13.</b> Datos de molienda en masa (g) para diferentes tiempos (min).....	85
<b>Tabla 14.</b> Datos de los cálculos del modelo cinético de distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann para un tiempo 00 (mineral base de chancado).....	86
<b>Tabla 15.</b> Datos de la constante de distribución y el coeficiente de correlación para el mineral de litio para diferentes tiempos de molienda .....	87
<b>Tabla 16.</b> D80 de las muestras del mineral de litio.....	91
<b>Tabla 17.</b> Distribución de tamaño de partícula fina y gruesa del mineral de litio. ....	92
<b>Tabla 18.</b> Valores de las constantes cinéticas del modelo Tovarov V.V.....	93
<b>Tabla 19.</b> Comparación de la dureza encontrada con los antecedentes. ....	98
<b>Tabla 20.</b> Densidades de mineral. ....	99
<b>Tabla 21.</b> Resultados de los datos para hallar la densidad aparente. ....	99



<b>Tabla 22.</b> Análisis Granulométrico de la muestra.....	101
<b>Tabla 23.</b> Resultados de las cinco muestras en ppm de litio.....	103
<b>Tabla 24.</b> Resultados de partículas por millón de la muestra 270-P2 (ppm) .....	107
<b>Tabla 25.</b> Resultados de análisis de difracción de rayos X en la muestra 270-P2 .....	112



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Petalita, mineral de donde se extrajo por primera vez el litio (Fuente: John Betts, elmundo.es).....	35
<b>Figura 2.</b> Estudio comparativo de los yacimientos y su porcentaje. (Fuente: Martí Moscoso, J. M. 2019).....	41
<b>Figura 3.</b> Color de Raya de la pirita .....	50
<b>Figura 4.</b> Componentes principales de un ICP-OES (Fuente: “ICP-OES e ICP-MS”. Universidad de Alicante). .....	52
<b>Figura 5.</b> Esquema del modelo de Bragg (Fuente: Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (DRX) en la minería industrial).....	56
<b>Figura 6.</b> Como actúa un Microscopio Electrónico de Barrido convencional (Fuente: Principios de microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X característicos. Universidad Nacional Autónoma de México) .....	59
<b>Figura 7.</b> Esquema de un Equipo SEM (Fuente: Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido).....	61
<b>Figura 8.</b> Resultado de SEM de cerámica antigua (Fuente: Aplicación de la Microscopía Electrónica de Barrido al estudio de los acabados de cerámica antigua de Galicia) .....	62
<b>Figura 9.</b> Vista de la Prueba de SEM en 100 $\mu\text{m}$ de una muestra de cerámica (Fuente: Caracterización por técnicas físicas de cerámicas antiguas provenientes de la "Huaca San Marcos", correspondiente al horizonte medio) .....	63
<b>Figura 10.</b> Vista de la Prueba de SEM en 5 $\mu\text{m}$ de una muestra de cerámica (Fuente: Caracterización por técnicas físicas de cerámicas antiguas provenientes de la "Huaca San Marcos", correspondiente al horizonte medio) .....	63



<b>Figura 11.</b> Movimientos comunes en el IR (Fuente: Stuart, 2004) .....	64
<b>Figura 12.</b> Interferómetro de Michelson (Fuente: Skoog, et al. 2005) .....	66
<b>Figura 13.</b> Vibración de Tensión y Flexión (Fuente: Morales Ramirez, C., & Solis Casados, D. A. 2013) .....	67
<b>Figura 14.</b> Gráfico de un resultado de FTIR (Fuente Muñoz, A. M., & Díaz, J. G. Caracterización físico-química de los ladrillos constitutivos del puente de arco sobre el río cauca, en popayán, Colombia). .....	68
<b>Figura 15.</b> Reducción de tamaño manual (Fuente: Propia) .....	73
<b>Figura 16.</b> Peso de la muestra después de la reducción de tamaño manual (Fuente: Propia).....	73
<b>Figura 17.</b> Chancadora de mandíbulas (Fuente: Propia) .....	74
<b>Figura 18.</b> Resultado de la chancadora de mandíbula (Fuente: Propia) .....	75
<b>Figura 19.</b> Molino de bolas (Fuente: Propia) .....	75
<b>Figura 20.</b> Cuarteado por rifleado (Fuente: Propia) .....	77
<b>Figura 21.</b> Determinación grafica de la constante de distribución ( $\alpha$ ) y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), para el mineral base de litio.....	87
<b>Figura 22.</b> Fracción restante (% de volumen) para siete tamaños representativos frente al tiempo de molienda del experimento 1. ....	89
<b>Figura 23.</b> Fracción restante (% de volumen) para siete tamaños representativos frente al tiempo de molienda del experimento 2. ....	90
<b>Figura 24.</b> Gráfico de $d_{80}$ v/s Tiempo, a medida que aumenta el tiempo, los valores de $P_{80}$ tienden a disminuir, lo que significa que se está reduciendo el mineral debido a la molienda .....	91
<b>Figura 25.</b> Linealización de los datos experimentales de molienda del mineral de litio. ....	93



<b>Figura 26.</b> Muestra del mineral de litio de Macusani - Puno (Fuente: Propia). .....	95
<b>Figura 27.</b> Color de raya del mineral (Fuente propia). .....	96
<b>Figura 28.</b> Determinación de la dureza en la escala de Mosh (fuente: Propia). .....	97
<b>Figura 29.</b> Cálculos del V. y P. para la densidad aparente (Fuente: propia) .....	100
<b>Figura 30.</b> Tamizador (Fuente: Internet) .....	101
<b>Figura 31.</b> Curva de granulometría (Fuente: Propia) .....	102
<b>Figura 32.</b> Cantidad de ppm de litio en el análisis ICP-OES (Fuente: Propia) .....	104
<b>Figura 33.</b> Resultado de DRX de una muestra que tiene Espodumena (Fuente: “Extracción de litio de $\beta$ -espodumeno mediante tratamiento térmico con cloruro de calcio”, Barbosa, et al., 2020).....	110
<b>Figura 34.</b> Resultados del Difractómetro de rayos X (Fuente: Laboratorio SLab). ....	110
<b>Figura 35.</b> Resultado de los análisis en porcentaje de composición química (Fuente: Propia).....	111
<b>Figura 36.</b> Resultado de la Transmitancia con numero de onda donde se muestra la sal de litio (Fuente: Laboratorio SLab) .....	113
<b>Figura 37.</b> Resultado completo de Espectroscopia Infrarroja (Fuente: Laboratorio SLab) .....	114
<b>Figura 38.</b> Resultado de FTIR del estudio realizado “Edad y caracterización de una mica de Litio asociada a un Sistema de Greisen en Mina la Rosario, sierra de Fiambalá, Catamarca” (Fuente: Avila, J. C., Rubinstein, N., Morello, O., & Fogliata, A. (2008).....	115
<b>Figura 39.</b> Resultados de FTIR del estudio realizado “Efecto del contenido de óxido de Litio en Formulaciones Catalíticas CoMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO-Li <sub>2</sub> O(x) para la hidrodesulfurización de dibenzotiofeno” Fuente: Solis D.A., Klimoya T. & Escobar J. (2013). .....	116



<b>Figura 40.</b> Resultado SEM de “Influencia de la atmosfera de control y tiempo de molienda sobre la morfología y microestructura de polvos de cobre y cobre-2.5% de litio producidos por aleado mecánico” (Fuente: Rojas, P. A., Álvarez, M. P., Peñaloza, A., Zúñiga, A. ....	117
<b>Figura 41.</b> Resultado con los puntos de referencias en el área 1 de SEM (Fuente: Laboratorio Slab) .....	118
<b>Figura 42.</b> Resultado con los puntos de referencia en el área 2 de SEM (Fuente: Laboratorio Slab) .....	119
<b>Figura 43.</b> Resultados de SEM de los puntos del Área 1 (Fuente: Laboratorios Slab)	120
<b>Figura 44.</b> Resultados de puntos del área 2 (Fuentes: Laboratorios Slab) .....	120



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo 1:</b> Informe de los análisis químicos por ICP-OES de litio en 5 muestras.....	128
<b>Anexo 2:</b> Informe de los análisis multi elemental por métodos de ICP-OES de la muestra representativa. ....	129
<b>Anexo 3:</b> Informe de los análisis FTIR y difracción de Rayos X realizados en el Laboratorio Slab.....	130
<b>Anexo 4:</b> Informe de análisis granulométrico y SEM. ....	132
<b>Anexo 5:</b> Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional. ....	135
<b>Anexo 6:</b> Declaración jurada de autenticidad de tesis. ....	136





## ACRÓNIMOS

DRX:	Difracción de rayos X
SEM:	Microscopia Electrónica de barrido
ICP-OES:	Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo
FTIR:	Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier
Mt:	Toneladas métricas
°C:	Grados Celsius
%:	Porcentaje
g:	Gramos
Kg:	Kilogramos
Ppm:	Partículas por millón
g/cm <sup>3</sup> :	Gramos por centímetro cubico
NA:	No hay datos
e:	Estimado
r:	Revisado
W:	Datos Retenidos
Li:	Litio
As:	Arsénico
U:	Uranio
Ag:	Plata
Al:	Aluminio
B:	Boro
Ba:	Bario



Be:	Belirio
Bi:	Bismuto
Ca:	Calcio
Cd:	Cadmio
Co:	Cobalto
Cr:	Cromo
Cu:	Cobre
Fe:	Hierro
Ga:	Galio
In:	Indio
K:	Potasio
Mg:	Magnesio
Mn:	Manganeso
Mo:	Molibdeno
Na:	Sodio
Ni:	Níquel
P:	Fosforo
Pb:	Plomo
Sb:	Antimonio
Se:	Selenio
Sn:	Estaño
Sr:	Estroncio
Te:	Telurio
Ti:	Titanio
Tl:	Talio



V: Vanadio  
Zn: Zinc  
Hg: Mercurio



## RESUMEN

En este estudio de investigación, tiene el objetivo general de determinar la cinética de la molienda y se llevaron a cabo análisis detallados de la composición mineralógica y química del mineral de litio proveniente del distrito de Macusani – Puno. La metodología consistió en extraer 70 kg de mineral al cual se realizó el chancado con un chancador de mandíbulas y luego con un molino de bolas, con tiempos de molienda de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50 minutos. Se realizaron ajustes con modelos matemáticos, como Gates-Gaudin-Schuhmann, Rosin Rammler y cinético de Tovarov V.V. El análisis físico del mineral incluyó dureza, color, densidad aparente, y la caracterización química mediante ICP-OES. Los resultados revelaron una constante de distribución promedio de 0.6473 con un R2 de 0.959 para el mineral de litio, y una variación del d80 entre 28267 y 1097  $\mu\text{m}$  en el rango de 0 a 48 minutos. La constante cinética (k) fue de 0.0794 para el mineral grueso y también para el fino. La concentración de litio fue de 2047.4 ppm, así como la presencia de varios elementos como Arsénico, Uranio, Plata, Aluminio, entre otros. La composición mineral se identificó como lepidolita, con una concentración del 7.97%. Las técnicas de DRX, SEM y FTIR respaldaron esta identificación. La fórmula química encontrada mediante SEM fue  $K(Al_{1.13}Li_{1.48}Mg_{0.39})(Al_{0.57}Si_{3.43}O_{10})(F_{1.62}(OH)_{0.38})$ . Se concluye que el mineral de litio de Macusani es apto para procesos de lixiviación ácida y básica debido a su naturaleza de lepidolita, la baja concentración requiere un preprocesamiento de concentración por flotación.

**Palabras clave:** Cinética de molienda, Caracterización, DRX, FTIR, ICP-OES, Mineral de Litio.



## ABSTRACT

In this research study, the general objective was to determine the grinding kinetics and detailed analysis of the mineralogical and chemical composition of lithium ore from Macusani district - Puno was carried out. The methodology consisted of extracting 70 kg of ore which was crushed with a jaw crusher and then with a ball mill, with grinding times of 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 and 50 minutes. Adjustments were made with mathematical models, such as Gates-Gaudin-Schuhmann, Rosin Rammler and kinetic of Tovarov V.V. Mineral physical analysis included hardness, color, bulk density, and chemical characterization by ICP-OES. The results revealed an average distribution constant of 0.6473 with an R2 of 0.959 for the lithium mineral, and a variation of d80 between 28267 and 1097  $\mu\text{m}$  in the range from 0 to 48 minutes. The kinetic constant (k) was 0.0794 for the coarse ore and also for the fine ore. The lithium concentration was 2047.4 ppm, as well as the presence of several elements such as Arsenic, Uranium, Silver, Aluminum, among others. The mineral composition was identified as lepidolite, with a concentration of 7.97%. XRD, SEM and FTIR techniques supported this identification. The chemical formula found by SEM was  $K(Al_{1.13}Li_{1.48}Mg_{0.39})(Al_{0.57}Si_{3.43}O_{10})(F_{1.62}(OH)_{0.38})$ . It is concluded that the Macusani lithium ore is suitable for acid and basic leaching processes due to its lepidolite nature, the low concentration requires flotation concentration preprocessing.

**Keywords:** Grinding kinetics, Characterization, XRD, FTIR, ICP-OES, Lithium Ore.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La demanda de litio en las baterías de ion-litio es cada vez más relevante ante la inminente escasez de combustibles fósiles. Sudamérica, que alberga las reservas más importantes de litio en el mundo, se presenta como una región clave en este escenario. El litio se está incorporando al nuevo patrón energético con un gran potencial tanto en el mercado actual como futuro, especialmente en la fabricación de automóviles eléctricos, teléfonos celulares y otros dispositivos electrónicos (Kazimierski, 2018).

Las reservas de litio se encuentran tanto en forma evaporítica como en minerales. Los evaporativos, como las salmueras de litio, son una importante fuente de litio, y se forman por la evaporación de cuerpos de agua, dejando depósitos de minerales disueltos. Por otro lado, el litio también se encuentra en minerales como la espodumena y la petalita (Cordano, 2018).

El litio, un mineral alcalino, ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a su importancia en la fabricación de baterías recargables para una variedad de usos, como en celulares, dispositivos eléctricos, automóviles y motocicletas eléctricas. Esta creciente demanda se debe a su capacidad de ionización y a la necesidad de almacenar energía, especialmente en el contexto del auge de los paneles solares. Sudamérica, con sus vastas reservas de litio, se encuentra en una posición estratégica para aprovechar este recurso, que se proyecta como fundamental en el mercado actual y futuro (Pablo & Quezada, 2021).

En el Perú se encontró reservas de 4.7 millones de toneladas (Mt) como carbonato de litio equivalente, en el depósito denominado Falchani, ubicado en la ciudad de



Macusani, provincia de Carabaya del departamento de Puno en el Perú, el cual se encuentra la empresa Canadiense llamada “Plateau Energy Metals Inc.”(Cordano, 2018).

La demanda de litio en las baterías de ion-litio está en aumento debido a la próxima escasez de combustibles fósiles. Sudamérica posee las reservas más importantes de litio en el mundo, lo que hace que el litio sea un recurso crucial para la región (Uribe et al., 2017). Este mineral se está convirtiendo en un pilar del nuevo patrón energético, con un gran potencial en el mercado actual y futuro, ya que se utiliza en una variedad de productos, incluyendo automóviles eléctricos, celulares y otros aparatos electrónicos (Gratal & Aguilar Bail, 2016). La importancia del litio como recurso estratégico se ve reflejada en la declaración de zonas de reserva minera de litio en algunos países (Kazimierski, 2018).

Las operaciones para la extracción de salmueras de Litio se están desarrollando en varios países como son el caso de Bolivia, Argentina, Chile, Estados Unidos y China, Mientras tanto que en el caso de las operaciones para la extracción del espodumeno de litio se desarrollan en otros países como en: Chequia, Austria, Canadá Filipinas, Portugal, España, Australia y China. Y las operaciones de minería en estado arcillosos se están desarrollando en Estados Unidos y México (Zapana, 2020)

En el presente trabajo se realizó el estudio cinético de la molienda del mineral de litio y caracterizar su composición mineralógica y química mediante el uso de las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) y la Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).



## 1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

- Justificación Ambiental. - Conocer las características de molienda, físico químicas, morfológica y mineralógicas, permiten seleccionar el proceso más adecuado a la hora de elegir los equipos de chancado, los que representan el 40% de consumo de energía en la industria minera. Por otro lado, permitirá seleccionar el proceso más adecuado como lixiviación acida o básica, flotación, los que implican el uso de reactivos químicos, que son tóxicos para el medio ambiente como el ácido sulfúrico, los espumantes, colectores.
- Justificación Social. - Una comprensión detallada de los minerales es esencial para garantizar la seguridad de los trabajadores y prevenir accidentes mineros. Además, puede proporcionar información valiosa para la planificación de la gestión de recursos minerales a nivel local, nacional y mundial, teniendo en cuenta aspectos de distribución geográfica y disponibilidad.
- Justificación Científica. - El estudio de las propiedades de los minerales contribuye al desarrollo del conocimiento científico en campos como la mineralogía, la petrología y la geoquímica. Proporciona información fundamental para comprender la formación de minerales, los procesos geológicos y la interacción de la Tierra y sus materiales.
- Justificación Tecnología. - Una comprensión detallada de las propiedades de los minerales es esencial para desarrollar y mejorar las tecnologías relacionadas con la minería, la metalurgia, la exploración de minerales, la ingeniería de materiales y la producción de energía. Esto puede conducir al progreso tecnológico, aumentando la eficiencia de los procesos industriales y el desarrollo de nuevos materiales para su uso en diversas industrias.





- Justificación Económica. - Conocer las propiedades de los minerales ayuda a evaluar su impacto en el medio ambiente durante la extracción, el procesamiento y la eliminación de desechos. Posibilita prácticas mineras responsables y sostenibles, reduce el impacto negativo sobre los ecosistemas, el agua y el aire y promueve la conservación de los recursos naturales.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA GENERAL

¿El modelo cinético de Tovarov V.V describe la cinética de la molienda y las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) permiten caracterizar la composición mineralógica y química del mineral de litio proveniente del distrito de Macusani?

### 1.2.1 Planteamiento de problemas específicos

- ¿El modelo cinético Tovarov V.V. describe la cinética de molienda del mineral de litio proveniente del distrito de Macusani – Perú?
- ¿Mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), se podrá determinar la composición mineralógica del mineral de litio proveniente del distrito de Macusani - Perú?
- ¿Las técnicas de Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) permitirá determinar la caracterización química del mineral de litio proveniente del distrito de Macusani - Perú?



### **1.3 HIPÓTESIS GENERAL**

Se determinará los parámetros que describen la cinética de la molienda del mineral de litio y se determinará su composición mineralógica y química utilizando técnicas de Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

#### **1.3.1 Hipótesis específicas**

- Se determinará los parámetros que describen la cinética de molienda del modelo cinético Tovarov V.V. para el mineral de litio proveniente del distrito de Macusani - Perú.
- Mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) se determinará la composición mineralógica del mineral de litio proveniente del distrito de Macusani - Perú.
- Se identificará la composición química del mineral de litio proveniente del distrito de Macusani - Perú mediante la Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).

### **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Realizar el estudio cinético de la molienda del mineral de litio y caracterizar su composición mineralógica y química mediante el uso de las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) y la Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).



#### 1.4.1 Objetivos Específicos

- Realizar el estudio cinético de la molienda del mineral de litio ajustando los datos experimentales al modelo cinético propuesto por Tovarov V.V.
- Analizar y determinar la composición mineralógica del mineral de litio de Macusani - Perú utilizando la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) y Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).
- Determinar los componentes químicos presentes en el mineral de litio proveniente de la provincia de Macusani - Perú mediante la Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) y analizar su influencia en la elección de un proceso de extracción.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.5 ANTECEDENTES

Ramirez et al., (2009) realizaron el estudio cinético de la molienda de la mena de cromita del yacimiento Albertina con el fin de determinar la capacidad de enriquecimiento de la mena, encontrando que la concentración de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  requiere de una molienda para lograr mayor liberación, determinaron los coeficientes  $m$  y  $k$  de la cinética de molienda propuesta por V.V. Tovarow. Emplearon una molienda en húmedo en un molino de bolas donde analizaron la variación de las variables de contenido sólido en la pulpa, tiempo de molienda y coeficiente de llenado, donde el coeficiente  $m$  tuvo un valor de 0.2966 y el coeficiente  $k$  de 0.4069, con lo que plantearon el modelo cinético de molienda.

Hernández et al., (2020) analizaron la cinética de molienda tamaño por tamaño y especie de las escombreras de Dos Carlos de la ciudad de Pachuca, Hidalgo, México; encontraron una composición química promedio de 70.43% de  $\text{SiO}_2$ , 7.032% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2.69% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 0.70% de Mn, 3.98% de  $\text{K}_2\text{O}$ , 3.34% de CaO, 2.50% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 1.01% de MgO, 0.26% de  $\text{TiO}_2$ , 0.04% de Zn, 0.026% de Pb, 56 g/ton de Ag y 0.6 g/ton de Au; donde las fases mineralógicas mayoritarias fueron: cuarzo, albita, argentita, berlinita, ortoclasa, jarosita de potasio argentífera, jarosita de sodio argentífera, feldespato, Anortoclasa, Calcita. Encontraron que a medida que el tiempo de molienda se incrementa hasta valores comprendidos entre 32 y 46 minutos, la distribución de los contenidos metálicos es muy similar y se encuentran dados por el rango de 200 a 400 mallas, la máxima velocidad específica de molienda global (tamaño por tamaño) y por especie correspondiente a la malla 200, para tamaños menores a la malla 200 se genera una



disminución en la velocidad específica por especie (plata), encontraron que el tiempo óptimo de molienda bajo estas condiciones estudiadas fue de 8 minutos.

Álvarez (2010) en su tesis Doctoral indica que en el contexto actual de crisis económica mundial, la Unión Europea (UE) busca promover una economía energética más sostenible y competitiva, lo que ha llevado a un enfoque en la eficiencia del sector energético, incluida la industria minera. Específicamente, la molienda de minerales se ha identificado como un punto crítico en el que se puede mejorar la eficiencia y reducir los costos operativos. Para lograr esto, es fundamental comprender y predecir con precisión el consumo energético en las operaciones de molienda. Si bien la metodología propuesta por Fred Bond en 1961 ha sido ampliamente aceptada para este propósito, existen desafíos en la variabilidad de los resultados debido a factores como la ley de distribución granulométrica y otras variables influyentes. Diversos modelos, como los de Gates-Gaudin-Schuhmann y Rosin-Rammler, se han comparado para obtener una representación más precisa de la distribución de tamaños de partículas. La mejora de la eficiencia en la molienda contribuiría a una utilización más responsable de la energía en la industria minera y en línea con las políticas europeas de sostenibilidad y seguridad energética.

Espinoza (2019) determinó la cinética de molienda de barbotina con diferentes concentraciones de sólido en la pulpa, en diferentes tiempos de molienda con el fin de analizar el comportamiento de la fractura de la partícula. La cinética de reducción de tamaño fue graficada en curvas  $d_{80}$  vs tiempo, consiguió determinar la concentración de sólidos en pulpa, conveniente para un proceso de conminución competente. Concluyendo que la concentración de sólidos de la suspensión aumenta el rendimiento de la molienda, al disminuir el tamaño de partícula y consiguiendo una molienda adecuada para nuestro material evitando consumo energético innecesario.



Namindo (2015) estudio la cinética de la molienda y el modelo cinético acumulativo del carbón bituminoso. Los ensayos de la cinética lo realizo en un molino de bolas de laboratorio con un diámetro de 19,5 y una longitud 24 cm. A partir de los resultados de la molienda utilizó un fichero en Microsoft Excel elaborado para tal efecto, obteniendo los valores de los coeficientes  $k_i$ , C y n del modelo cinético acumulativo. Obteniendo las curvas de la cinética del proceso de molienda para las clases granulométricas estudiadas y los valores de los coeficientes de modelo cinético-acumulativo.

Nyembwe et al. (2019) determinaron la estructura, composición y la mineralogía de sulfuros carbonatados de cobre provenientes del mineral de cantera, concentrado y el relave. Utilizaron tres métodos de análisis, como: microscopía óptica, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X, (FTIR) y microscopía de barrido electrónico (del inglés Scanning Electron Microscopy - SEM) in conjunction with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), con el fin de las propiedades del grano mineral (textura y color), química, distribución de fases mineralizadas, grupos funcionales, morfología de granos minerales y distribución de elementos. Donde el proceso de concentración fue efectivo, en FTIR encontraron que hay existencia de un grupo sulfuro relacionado con la mineral calcopirita. Asimismo, observaron granos de calcopirita libre en el concentrado mediante análisis SEM, y se confirmó su presencia mineral. por los resultados del análisis EDS. Todas las técnicas de caracterización por microscopía óptica.

El Miz et al., (2017) realizaron la caracterización físico química de la bentonita de Marruecos tomado de Nador, realizaron análisis mineralógicos, químicos y fisicoquímicos, incluyendo la composición mineralógica determinada por difracción de rayos X y Espectroscopia Infrarroja. El mineral fue pre tratado con el fin de eliminar las impurezas. En la composición química se encontró bajas concentraciones de Fe, Al y Si.



La composición mineralógica es típica de las muestras de bentonita, que consiste principalmente de montmorillonita. así mismo, Los resultados revelaron que esta arcilla tiene la calidad necesaria en diversas aplicaciones tales como cosméticos, medicamentos, pinturas, etc. nano materiales

Saucedo y Galicia (2017) elaboraron un manual para preparar las muestras para su análisis por microscopía de electrónica (SEM) y difracción de rayos X (DRX). Con el objetivo que los estudiantes de pre y posgrado, puedan preparar correctamente las muestras para ser enviadas a los análisis SEM, así como a los análisis DRX. Esta etapa es de carácter vital, debido que cada análisis presenta sus requisitos y condiciones para la muestra. Por otro lado, el estudio de la características morfológicas y estructurales de los compuestos químicos, nos permite dominar las propiedades, generar nuevos procesos y mejorar estos. Así mismo, posterior a los análisis se podrá describir apropiadamente la morfología y la estructura de los compuestos de interés.

Chatterjee et al. (2015) realizaron las caracterizaciones estructurales, micro estructurales y térmico del concentrado de calcopirita de la zona de “Singhbhum” en la India. Asimismo, realizaron la caracterización estructural, concentrado de la calcopirita y la morfología del concentrado de morfología mediante los siguientes métodos: difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de rayos X con dispersión de energía. Por otro lado, para respaldar los resultados también aplicaron los siguientes métodos espectropicos: (FTIR, Raman, UV-visible) y XRD. También revelaron una oxidación marginal de la fase de sulfuro. Donde la brecha de banda de energía del sulfuro fue de “3.4 eV”. Análisis térmico diferencial y termo gravimetría del concentrado mostró una descomposición de calcopirita a una temperatura de 658 °K con una energía de activación de 208 kJ·mol<sup>-1</sup>, y dos cambios estructurales sucesivos de sílice a las



temperaturas de 848 °K y 1145 °K. También encontraron un concentrado que contiene más de 16% en peso de cobre en la calcopirita.

Chen et al., (2015) realizaron una revisión de las investigaciones donde se aplicaron la espectrometría Infrarroja con Transformada Micro-Fourier (FTIR). Las investigaciones demostraron que el empleo de la micro-FTIR permite visualizar y caracterizar la distribución de la materia orgánica y de minerales, a escala micrómetros en muestras geológicas, y promover un avanzado entendimiento de la heterogeneidad de estos. Así mismos, esta técnica es de carácter no destructivo de la muestra, y se aplica a pequeños fluidos, líquidos fundidos, gases y minerales.

Rossel et al. (2006) determinaron la composición de las mezclas de minerales orgánicos mediante (UV-VIS-NIR) y espectroscopia de reflectancia difusa (DRS). Diseñaron un experimento que pueda usarse para modelar mezclas minerales orgánicos en función de sus espectros de reflectancia difusa ultravioleta (UV), visible (VIS), infrarrojo cercano (NIR) y utilizaron estos modelos para predecir la composición mineral orgánica de mezclas en pruebas independientes. Utilizaron un diseño de experimento simple de tres factores y con tres niveles correspondiente a “caolinita (K), illita (I) y esmectita (S)”. A estas muestras agregaron dos niveles de goethita (G) y dos niveles de una mezcla 50/50 de ácidos húmicos y fúlvicos (H – F). Como etapa final agregaron 3 niveles de cuarzo (Q) a las mezclas. Modelaron los datos y usaron la regresión de mínimos cuadrados parciales1 algoritmo (PLSR1) e hicimos la predicción usando bootstrap aggregation-PLSR (o bagging-PLSR). El número de factores en los modelos PLSR fueron seleccionados por validación cruzada de dejar uno fuera. Estos modelos se probaron de forma independiente utilizando mezclas que creamos para representar aproximadamente la composición mineral-orgánica de suelos australiano común.





Moecher (2004) realizó la caracterización e identificación mineralógica de minerales desconocidos, basándose en sus propiedades físicas mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) y las propiedades ópticas con el microscopio petrográfico. La técnica de Difracción de Rayos X (DRX) permite determinar la estructura cristalina (mediciones de espacio interplanares y los parámetros de la celda), también determinaron el índice de Miller y el espectro magnético. La ecuación de Bragg es la utilizada en esta técnica ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ). La técnica de microscopía óptica se basó en la luz transmitida, basándose en las propiedades isotrópicas o anisotropías de los minerales

Madejov (2003) estudió la caracterización de los minerales arcillosos mediante la técnica de espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), donde determinó la estructura, composición y el cambio de la estructura con la modificación química. Observaron que en los minerales arcillosos las bandas de absorción debido a los grupos estructurales OH y Si-O con frecuencia juegan un rol importante en la diferenciación de los minerales arcillosos.

Xu et al., (2001) realizaron el análisis cuantitativo de minerales con alta cristalinidad mediante Difracción de Rayos X (DRX), sin embargo, para minerales con amorfos y con poca cristalinidad la DRX no proporciona información cuantitativa. En esta investigación desarrollaron un procedimiento para eliminar la línea base del espectro (LBSP, del inglés Linear Background Subtraction Procedure), utilizaron la herramienta macros del EXCEL™, donde primero se determinó la absorbancia mínima de un espectro y este mínimo fue ajustado a todo el espectro. Los resultados del procedimiento son +/- 2,5 mejora el análisis espectral, por lo que, la eliminación de los antecedentes de un espectro es un factor clave para el análisis cuantitativo. Así mismo, el método espectroscópico FTIR es superior a XRD porque es sensible a minerales amorfos, así como fases cristalinas.



Cook (2000) realizó la caracterización mineralógica de los depósitos industriales en el Servicio Geológico de Noruega. Hicieron un Análisis de difracción de rayos X (DRX), (EPMA) del inglés Image Analysis, Quantitative Electron Probe Microanalysis y (SEM) del Inglés Scanning Electron Microscopy se está convirtiendo en métodos de rutina y complementa los estudios microscópicos tradicionales y análisis geoquímico, Otras técnicas innovadoras que utilizaron fue el de microhaz como la ablanda con(LA-ICP-MS) del inglés Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy, ya que la necesidad de microanálisis en los límites de detección más bajos que intensifican. Para la industria cada vez es más importante saber este tipo de información de cada recurso y el valor de los datos de caracterización mineral.

Para la metodología de la investigación científica, el estudio se inició con un análisis de carácter bibliográfico, para este caso se empezó recabando información sobre el "Litio", en qué estado se encuentra en los minerales, las reservas que tiene el mundo, las producciones de años anteriores de los países que tiene este recurso, a que países lo exportan y de cómo lo comercializan, todo esto para ver qué tipo de mineral de litio es el que se encuentra en Macusani, provincia de Carabaya en el departamento de Puno en Perú.

## **1.6 MARCO TEORICO**

### **1.6.1 Litio**

El litio es un elemento químico que se encuentra en el grupo 1 de la tabla periódica. En su forma pura, es un metal blando de color blanco plateado, altamente reactivo y con un bajo punto de fusión. Se emplea en una variedad de aplicaciones, incluyendo aleaciones conductoras del calor, baterías eléctricas, cerámicas, medicina y en componentes de equipos de aire acondicionado. Es el

metal sólido más ligero y se encuentra moderadamente abundante en la corteza terrestre. Posee un punto de fusión muy bajo y una reactividad electroquímica muy elevada, dentro de sus propiedades físicas la que más resalta es la conductividad eléctrica, su baja viscosidad, su alta capacidad térmica y por último su coeficiente bajo de expansión térmica (Marti, 2019).

En la **Figura 1** se puede mostrar la foto de la Petalita mineral que contiene litio que fue descubierto por Johan August Arfedson, desde su descubrimiento han pasado más de 200 años.



**Figura 1.** Petalita, mineral de donde se extrajo por primera vez el litio (Fuente: John Betts, elmundo.es)

### 1.6.2 Características y propiedades del litio

El Litio fue descubierto en el año de 1817, por Johan August Arfedson, lo extrajo a partir de la “petalita” con una fórmula química  $LiAl(Si_2O_5)_2$  y él lo bautizó como litio en honor al nombre en griego de la piedra “Lithos”, este es un mineral blanco plateado como se puede mostrar en la Figura 1.

El litio es un elemento químico de aspecto blanco plateado, perteneciente al grupo de los alcalinos, con número atómico 3 y símbolo Li. Entre sus propiedades físicas, se encuentra su estado ordinario como sólido (no magnético),

con una densidad de  $535 \text{ kg/m}^3$ , un punto de fusión de  $453,69 \text{ }^\circ\text{K}$  ( $181^\circ\text{C}$ ) y un punto de ebullición de  $1615 \text{ }^\circ\text{K}$  ( $1342 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

En cuanto a sus propiedades químicas, el litio es un metal univalente y altamente reactivo, aunque menos que el sodio, y se oxida rápidamente en aire o agua. Es inflamable y puede arder espontáneamente en contacto con el aire cuando se dispersa en finas partículas, lo que puede ocasionar un riesgo serio de incendio. Además, reacciona violentamente con el agua, formando gas hidrógeno altamente inflamable y vapores corrosivos de hidróxido de litio (Valencia, 2016).

**Tabla 1.**

*Propiedades físicas y químicas del litio.*

Propiedades	Litio
Numero atómico	3
Valencia	1
Estado de oxidación	+1
Electronegatividad	1.0
Radio covalente(A)	1.34
Radio iónico (A)	0.60
Radio Atómico (A)	1.55
Configuración electrónica	$1s^2 2s^1$
Primer potencial de ionización (eV)	5.41
Masa Atómica (g/mol)	6.941
Densidad(g/ml)	0.53
Punto de ebullición ( $^\circ\text{C}$ )	1330
Punto de fusión ( $^\circ\text{C}$ )	180.5

Fuente: Lenntech (1907).

En la Tabla 1 se puede mostrar las propiedades del litio, así mismo, el litio es muy inestables y explosivo en presencia del oxígeno, es por eso que se almacena en aceite para evitar que reacción con el aire, el litio es uno de los que puede llegar a liberar mayor cantidad de electrones por eso es bueno para el uso en baterías (Saavedra, 2019).

El litio se encuentra presente en una amplia gama de minerales, alrededor de 145 especies mineralógicas, pero solo algunos poseen valor económico. Algunos de los minerales de litio cuya explotación es rentable a nivel económico incluyen la espodumena, lepidolita, ambligonita, trifilita, petalita y zinwaldita. Estos minerales son la fuente principal de obtención de litio para su uso en diversas aplicaciones industriales y medicinales (Calcaneo,2018).

En la siguiente **Tabla 2** se puede mostrar el nombre de mineral y la composición química de cada una de ellas.

**Tabla 2.**

*Los minerales de litio su nombre y composición química.*

Nombre	Composición química
Lepidolita	$KLi_2Al(AlSi)_3O_{10}(F, OH)_2$
Espodumena	$Li Al Si_2O_6$
Petalita	$LiAlSi_4O_{10}$
Ambligonita	$(Li, Na)Al(PO_4)(F, OH)$

Fuente: Diaz, et al., (2009).

### 1.6.3 Usos del Litio

El litio se llega a usar en una variedad de sectores, pero donde se llega a aplicar más, es en las baterías de litio, debido a que estas son indispensables para los automóviles eléctricos, al igual que los aparatos eléctricos que usan baterías; debido a que se realizara un reemplazo a los automóviles de combustión, posiblemente por una escases de los recursos fosilices y carbón, las baterías de litio suplantarán en gran parte a lo que es el sector automotriz, en vez de los motores de combustión van a ser motores eléctricos, y a la vez suplantando totalmente a las baterías de cadmio con níquel y baterías de plomo que se utilizaban en su mayoría en el sector automotriz para el encendido del motor, y en el caso de las motocicletas también es el mismo (Saavedra, 2019).



Se utiliza como agente de aleación, en la síntesis del compuesto orgánico y se le añade como en los casos para la creación de vidrio y cerámica, el Bromuro de litio y cloruro de litio son ampliamente higroscópicos, por lo cual se llegan a utilizar como agentes secantes, además también tiene aplicaciones médicas (Posada, 2021).

La manera de comercialización de litio es en forma de carbonato de litio " $Li_2CO_3$ ", esto se va produciendo a partir de minerales o salmueras por una serie de procesos diferentes, además que se adiciona ácido clorhídrico (HCl) para posteriormente producir en cloruro, este compuesto es usado para producción de litio metálico por electrolisis, no obstante, se produce por electrolisis de una mezcla fundida de cloruros de litio y potasio (Flores,2020).

El litio ha sido una de las principales revoluciones para la psicofarmacología en el tratamiento, esto fue descubierto desde hace casi 200 años atrás, a lo largo de la historia tuvieron una aplicación terapéutica, con efectos de antidepresivos, en recaídas en personas bipolares y en personas que presentan conductas suicidas, pero también se descubrieron diferentes efectos secundarios (Tondo & Baldessarini, 2015).

Encontraron su primera aplicación en la aviación durante la Segunda Guerra Mundial, y más tarde como un lubricante de motor de alta temperatura. Durante la Guerra Fría, se usaron isotopos de litio-6 y de litio-7 en la creación de la bomba de hidrogeno, ya que producen tritio cuando son irradiados por neutrones.

El deuteruro de litio o hidruro de litio se usó como combustible sólido de fusión en bombas de hidrogeno. Después de que la carrera armamentista nuclear



llego a su fin, la producción de litio disminuyo un poco. El fluoruro de litio se utiliza en IR, UV y óptica UV al vacío, si el polvo de fluoruro de litio finamente dividido está expuesto a la radiación, el fluoruro de litio se utiliza de tal manera en la dosimetría de radiación termoluminiscente y también se utiliza en los lentes de un telescopio, además libera una luz azulada, cuya intensidad proporcional a la dosis absorbida (Calcáneo, 2018).

El litio tiene una constituyente actualmente como fármaco ideal para la manía, psicosis maniaco depresiva, y para algunas formas tipificadas de trastornos como por ejemplo en la esquizofrénicos y depresivos el suministro debe de ser controlado con un médico especialista y su uso debe de hacerse con cautela y controlado por litemia de manera adecuada, más del 60% de los pacientes que fueron diagnosticados con de manía o de psicosis maniaco-depresiva mostraron una considerable mejoría con administración de litio en dosis de 300 mg, con una manera de ingerir de 3 a 6 veces por día, especialmente en las fases de agudas de manía (León Gómez, 1949).

En la década de los 60, del siglo XX, se empezó a emplear el litio para la fabricación de grasas que se utilizaban como lubricantes en un amplio intervalo de temperaturas, en una gran variedad de usos industriales, destacándose como los catalizadores en la fabricación de caucho sintético, además se emplea en la fabricación de esmaltes, loza, porcelana, sanitarios, envases o cajas refractarias, donde se colocan los platos de loza y/o porcelana para su cocción en los hornos tipo túnel (Diaz et al, 2009).

En la Tabla 3 se puede llegar a mostrar, lo que son: los principales compuestos específicos que contiene litio, y el uso que se puede dar en la Industria

a nivel mundial, donde se menciona las más relevantes según un estudio hecho por el “Instituto de Investigaciones geológicas” que se realizaron en el año de 1993.

**Tabla 3.**

*Aplicaciones de los subproductos del Litio en la Industria*

Compuesto de litio	Usos Industriales
	Elaboración de vidrio.
Carbonato de litio	Producción de esmaltes para cerámicas. Ingrediente crítico en la fabricación de tubos de televisión. Tratamiento de desórdenes mentales. Fabricación de grasas lubricantes de usos múltiples. Obtención de litio metálico.
Hidróxido de litio	Absorbente de $CO_2$ en vehículos espaciales y submarinos. Componente del electrolito del acumulador de Edison que se emplea en los submarinos, instalaciones telefónicas y fuentes de energía eléctrica para ferrocarriles y teléfonos. Obtención del isotopo-6 de litio.
Bromuro de litio	Catalizador en la fabricación de polímeros utilizados en la industria del caucho. Control de humedad de gases. Preparación de sedantes nerviosos
Bromuros y yoduros de litio	Aplicación en la fotografía.
Bromuros y cloruro de litio	Acondicionamiento de aire. Aleaciones, soldaduras especiales y otros fundentes. Obtención de litio metálico.
Fluoruro de litio	Aleaciones y soldaduras especiales
Litio alcalino	Metalúrgica del aluminio
Hipoclorito de litio	Sanitarios y blanqueadores
Peróxido de litio, borohidruro de litio	Esterilización del agua de piscinas
Hidruro de litio	Aleaciones
Hidruro de aluminio-litio	Fabricación de oxígeno e hidrogeno Producción de hidrogeno Reducción de compuestos orgánicos a la temperatura ambiente en soluciones de éter Fabricación de bombas de tritio Catalizador de polímeros Metalurgia del aluminio
	Aleaciones de litio-Aluminio de gran resistencia bajo condiciones de alta temperatura.
Litio metálico	Limpiador y desengrasador de los aceros dúctiles inoxidables y como desoxidante y purificador en la fundición de cobre y aleaciones de hierro níquel y cobre. Aleaciones extra livianas de litio-magnesio utilizadas principalmente en la industria espacial. Refrigeración de los reactores como fluido intercambio de calor en las aplicaciones de altas temperaturas, y como ingredientes de los combustibles de cohetes espaciales.

Fuente: “El Litio”- Instituto de investigaciones geológicas. Boletín minero #72 (1993)



#### 1.6.4 Fuentes de Litio

El litio no se encuentra totalmente libre en la naturaleza, se puede encontrar en muy pequeñas cantidades como en el caso de aguas de manantiales, y prácticamente en la roca ígnea, que se encuentran en forma de lepidolita, petalita, ambligonita y en forma de espodumena, además el metal litio se produce electrolíticamente a partir del cloruro fundido (Posada, 2021).

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (UGS), las principales fuentes de litio, dentro de ellas tenemos las siguientes: salares en cuencas cerradas con un 58%, rocas pegmatitas y granitos con un 26%, en arcillas enriquecidas en litio con un 7 %, en salmueras de yacimientos petroleros con un 3%, en salmueras geotermales con un 3% y por último, no menos importante en las zeolitas enriquecidas con litio con un 3%, así mismo se puede mostrar en la siguiente Figura 2 (Martí, 2019).



**Figura 2.** Estudio comparativo de los yacimientos y su porcentaje. (Fuente: Martí Moscoso, J. M. 2019)

También esto va depender de los principales productores de litio, las cuales la comercializan en forma de carbonato de litio, además de las reservas que tiene cada país, donde se encuentran de forma natural que pueden encontrar de las siguientes formas: en forma de lepidolita, petalita, amblygonia y en forma de espodumena, las reservas que se tiene nivel mundial se logra mostrar en la tabla 4, además donde se logra ver principales productores de litio del año 2006, según Mineral Commodity Summaries en su publicación, con el cual se logra armar la **Tabla 4**, en base a los datos recabados pero no se tiene en consideración, al yacimiento que se encontró en Macusani en el departamento de Puno en el Perú.

**Tabla 4.**

*Principales productores de litio en el 2006*

País	Producción minera en 2006 (toneladas métricas)	% de la producción minera mundialmente conocida	Reservas demostradas 2006 (toneladas métricas)	% de reservas mundiales demostradas
Chile	8,200	35	3,000,000	27
Australia	5,500	23	260,000	2
Argentina	2,900	12	NA	NA
China	2,820	12	1,100,000	10
Rusia	2,200	9	NA	NS
Canadá	707	3	360,000	3.0
Zimbabue	600	3	27,000	0.2
Portugal	320	1	NA	NA
Brasil	242	1	910,000	8
Bolivia	-	-	5,400,000	49
Estados Unidos	-	-	410,000	4
Total, mundial	23,500	-	11,000,000	-

Fuente: Departamento del Interior de EE.UU., Mineral Commodity Summaries (2007).

En el mundo solo se les considera a diez minas de litio, como las más importantes, según el estudio que realizó Flores Oscar en el año del 2020, y que se puede mostrar en la tabla 5, donde nos da el tiempo de vida útil estimada aproximadamente en algunas minas de litio, no en todas y también se logra ver la

cantidad de litio en toneladas métricas (Mt), además nos da la ubicación de los proyectos, y también el nombre de cada una de las minas, pero en esta tabla 5 tampoco se está considerando al yacimiento encontrado en Macusani en Perú debido a que no tiene mucha antigüedad como las minas que se está considerando en la **Tabla 5** (Flores, 2020).

**Tabla 5.**

*Las diez minas de litio más grandes del mundo*

#	Nombre del proyecto	Ubicación	Cantidad de Litio	Vida Útil Estimada
1	Proyecto Sonora Lithium	México (Sonora)	243,8 Mt	19 años
2	Proyecto de litio Thacker Pass	EE.UU.(Nevada, Humboldt)	179,4 Mt	46 años
3	Proyecto Wodgina Lithium	Australia (Port Hedland)	151,94 Mt	---
4	Proyecto Pilgangoora Litio Tantalio	Australia (Pilbara)	108,2 Mt	---
5	Proyecto de litio Earl Grey	Australia Occidental (Holland)	94,2 Mt	47 años
6	Proyecto Greenbushes Lithium	Australia Occidental (Greenbushes)	86,4 Mt	---
7	Proyecto de litio Whabouchi	Canadá (Quebec)	36,6 Mt	---
8	Mina de Litio Pilgangoora de Altura Mining	Australia Occidental (Pilbara)	34.2 Mt	13 años
9	Proyecto de litio Goulamina	Bougouni en el sur de Mali	31.2 Mt	16 años
10	Proyecto Arcadia Lithium	Harare Zimbabwe	29.8 Mt	12 años

Fuente: Minería en línea.com: Manual Flores Oscar (2020).

Es importante saber la producción de cada país de litio, en cada año que cantidad de litio ha producido y además también es importante saber en qué tipo mineral se encuentra el litio, si está en forma de Espodumena, Petalita, Lepidolita o en forma de Ambligonita, porque se sabe que se comercializa en forma de Carbonato de Litio, en la siguiente tabla 6 se puede mostrar, la producción de litio de los siguientes años: 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 en toneladas métricas (Mt) que se han producido en algunos países, cercanos a Perú según Mineral Yearbook

en el estudio que realizo en el año 2009, no todos los países reportan los datos de producción, pero de algunos reportes de los países si reportan este dato como se puede mostrar en la **Tabla 6**.

**Tabla 6.**

*Producción Mundial de litio Toneladas Métricas*

País/Año	Compuesto de Litio	2003	2004	2005	2006	2007 e
Argentina	Carbonato de litio	2850 e	4970	7300	8240 r	8500
	Cloruro de litio	4700 e	6303	8400	8320 r	8500
Australia	Espodumena	124410	118451	173635	222101	220000
Brasil	Concentrados	9755 r	9084 r	8924	8950 r	9000
Canadá	Espodumena	22500	22500	22500	22500	22500
Chile	Carbonato de litio desde salmuera	41667	43971	43595	50035	55500
	Cloruro de litio	--	494	681	1166	4200
China	Carbonato de Litio	13500	14000	15000	15000	16000
Portugal	Lepidolita	24606	28696r	26185	28497	28500
Rusia	Minerales no especificados	-- r	-- r	-- r	-- r	--
EE.UU.	Salmueras	W	W	W	W	W
Zimbabue	Amblygonita, eucryptita, lepidolita, petalita, y espodumena	12131	13710	37499	30000	15000
Total		256119	262179	343719	394809	387700

Fuente: Mineral Yearbook (2009).

De la anterior **Tabla 6** presentada tenemos los siguientes datos: dónde “e” es igual a estimado, “r” es igual a revisado, W es datos retenidos, estas abreviaturas solo sirven para la anterior tabla 6, presentada. Además, hay otros países que no reportan su producción debido a que su producción es muy pequeña, y no tiene mucha influencia, es por tal motivo que no se sabe exactamente cuánto es su producción anual, debido a que no lo reportan a ninguna entidad este dato, o porque su producción lo majen de manera confidencial.



La manera de extracción de litio es muy diferente a la de mina de oro, ya que no se utilizan explosivos ni lixiviación en las pilas, el litio en estado de salmuera se trata a través del drenado del subsuelo de las salinas, para posteriormente dejar la salmuera al sol para su secado, una vez seco el mineral se realiza las precipitaciones, para poder finalmente añadirle el carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ) y así se pueda generar el carbonato de litio ( $Li_2CO_3$ ) para su posterior comercialización (Pando, 2019).

### **1.6.5 Forma de Comercialización de Litio e Importancia Económica**

La importancia económica va depender de la demanda por los países desarrollados, ya que ellos utilizan el litio para la producción de baterías de litio, que son indispensables para sus automóviles eléctricos, ya que las baterías de litio son mejores que las baterías convencionales, y es por eso que tiene una alta demanda como por ejemplo: en el año 2009 en los países como China, Japón y Corea estos tres países juntos, sumaron más del 40% de las importaciones de carbonato de litio, mientras que solo Estados Unidos tubo casi el 20% de importación de carbonato de litio, y por último de la importación del carbonato de litio lo cubrió la Unión Europea (Manrique, 2016).

## **1.7 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS**

Para la caracterización de algunas propiedades como: la dureza, el color, el color de raya y la densidad aparente se hallan de manera experimental, en base a algunos antecedentes para posteriormente compararlos con los datos registrados en el “Manual de Mineralogía”.



### 1.7.1 Dureza

La dureza de un mineral es una propiedad física que se utilizó, para la identificación de los minerales. En sí, la dureza es un de las características que mide la resistencia de la muestra del mineral, y que nos ofrece una superficie lisa o de abrasión. Para los minerales es la resistencia al momento de ser rayada la superficie, y ver la profundidad de la raya. Pero hay varios métodos de medir la dureza dentro de ellas la más conocida es la escala de mosh, aparte de esta escala también existe la escala de Knoop, y el ensayo de la dureza de Brinell, que estos también nos ayuda a identificar la dureza, pero la más utilizada es la escala de Mosh, o también conocida como “La dureza de Mosh” ya que es la más aplicada (Moreno & Ibañez, 2018).

A pesar de la falta de precisión en la escala de Mohs, ésta sigue siendo útil porque es simple, fácil de recordar y fácil de probar. El acero de un cuchillo (un instrumento común que los geólogos llevan al terreno o al campo de muestreo), se encuentra casi en el medio de su longitud, así que es fácil distinguir la mitad superior de la inferior. Un claro ejemplo vendría a ser el cuarzo y la calcita son muy similares, pero ambos son claros, sin color, translúcidos y se presentan en una gran variedad de rocas, pero la simple prueba de la escala de mosh de raspado puede distinguirlos: el cuchillo, o un clavo de cemento, rayan la calcita, pero no llegan a rayar el cuarzo. Otro claro ejemplo sería el caso del yeso puede también parecerse mucho a la calcita, pero no es lo mismo ya que el yeso es tan blando que puede rayarse con la uña, y en el caso de la calcita no logra rayarlo (Egger, 2005).

### 1.7.1.1 Escala de Mosh

En el siglo XIX exactamente el año de 1822, el geólogo Friedrich Mohs de nacionalidad alemana, definió la escala de manera cualitativa, además que esta es caracterizada por la resistencia, al momento de ser rayada la muestra o el mineral que esta da, la capacidad de rayar del material más duro hasta el material más blando.

Es a partir de esto que se le considera como el test de mosh, si bien es cierto esta escala no es muy exacta y a la vez poco precisa, esto radica en la composición química de las muestras de los minerales, pero nos ayuda a hacer un aproximado de la dureza de la muestra a tratar, en la siguiente **Tabla 7** se puede mostrar la escala de mosh y la dureza que empieza desde el talco como lo más blando, y que termina con el diamante como la más dura, que esta logra rayar a todos los minerales (Moreno & Ibañez, 2018).

**Tabla 7.**

*Escala de Mosh*

Dureza	Mineral
10	Diamante
9	Corindon
8	Topacio
7	Cuarzo
6	Ortoclasa
5	Apatita
4	Florita
3	Calcita
2	Yeso
1	Talco

Fuente: Moreno Ramón, H., & Ibañez Asensio, S.  
(2018)

### 1.7.2 La densidad Aparente

Para hallar la densidad aparente se tiene que hallar primero, el volumen del mineral, y el peso del mineral de manera experimental, se necesitara agua destilada para poder hallar la diferencia de volumen, con una probeta y una balanza digital en gramos, y se recomienda mínimo 4 experimentos, para poder sacar el promedio varios experimentos y poder hallar la densidad aparente.

Para hallar la densidad de forma experimental vendría a ser la densidad aparente, en el caso de los minerales varían de  $1.01 \text{ g/ml}$  hasta aproximadamente  $17.5 \text{ g/ml}$ , por tal motivo es que en el caso, de los minerales su densidad se debe de encontrar dentro de los rangos ya mencionados, para poder hallar la densidad exacta de un mineral requiere de mayor tiempo, pero en este caso la mayoría de los geólogos experimentados, recomiendan guiarse de la siguiente **Tabla 8**, donde se tiene datos de los principales densidades como son: el agua, el hierro y el oro, en la siguiente **Tabla 8** se muestra la base de las densidades (Egger, 2005).

#### **Tabla 8.**

*Densidad de alguno elemento*

Tipo de elemento	Densidad g/ml
Agua	1.0 g/ml
Hierro	7.6 g/ml
Oro	17.65 g/ml

Fuente: Anne E. Egger, Ph.D. "Minerales II"  
Visionlearning (2005).

### 1.7.3 Otros aspectos físicos del mineral

Dentro de los demás aspectos físicos del mineral los relevantes son: el brillo, el color, el color de la raya y la granulometría.





### **1.7.3.1 Brillo**

El brillo de una muestra de cualquier mineral se va dando, de como refleja la luz en el mineral, una vez que choque los rayos de la luz con el mineral y este brille, hay que imaginarnos la manera del como refleja la luz una ventana de vidrio, y en el caso de los parachoques como refleja el brillo debido al cromo brillante, el mineral que refleja la luz de tal manera que parece vidrio se le conoce como brillo vítreo o vidrioso (Egger, 2005).

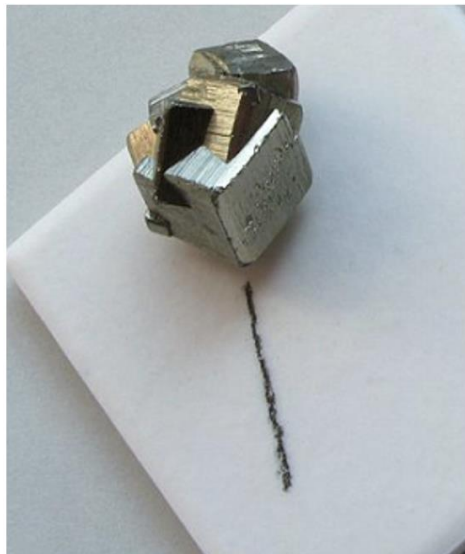
### **1.7.3.2 Color**

El color es una propiedad del mineral, y a la vez es una manera de diagnosticar y comparar con otros minerales, es complejo debido a que este método tiene una variedad de problemas, debido a que muchos minerales son similares y tienen el mismo color, no obstante, no hay solo una forma de diagnosticar sino que, hay varias formas de saber de qué color es el mineral, esta se debe a que en esta parte de los diagnósticos del color intervienen los componentes como la estructura, y la composición del cristal ya que esta intervienen en el color, si bien es cierto la manera de identificar un mineral no es muy dable por el color, debido a que varios se parecen mucho y se diferencian por otros tipos de rasgos físicos (Egger, 2005).

### **1.7.3.3 Color de raya**

El color de la raya se hace de una manera experimental, rayando la muestra en un pedazo de cerámica, al momento de ser rayado y este va dar un color de raya en la cerámica o porcelana, si bien es cierto el mineral es de color amarillo como la pirita, pero su raya es de color negra o gris, y en

el caso del oro su color es dorado y su raya es color amarilla, de esta manera se puede llegar de diferenciar entre la pirita y el oro, un claro ejemplo se puede visualizar en la siguiente **Figura 3**, vendría a ser la azurita, que nos da una raya de color azul, en el caso del cuarzo nos da matices de un blanco lechoso, además que la raya negra que nos genera el grafito al contacto con la cerámica, en cambio en la hematita nos genera un color pardo rojizo, y otro claro ejemplo seria la malaquita con un color verde claro al rayar la porcelana (Mendoza, 2011).



**Figura 3.** Color de Raya de la pirita

*Fuente <https://iesnuevojerez.blogspot.com/2018/10/como-identificar-un-mineral.html>*

En el caso de algunos minerales el color está bien determinado, un claro ejemplo



#### 1.7.3.4 Granulometría

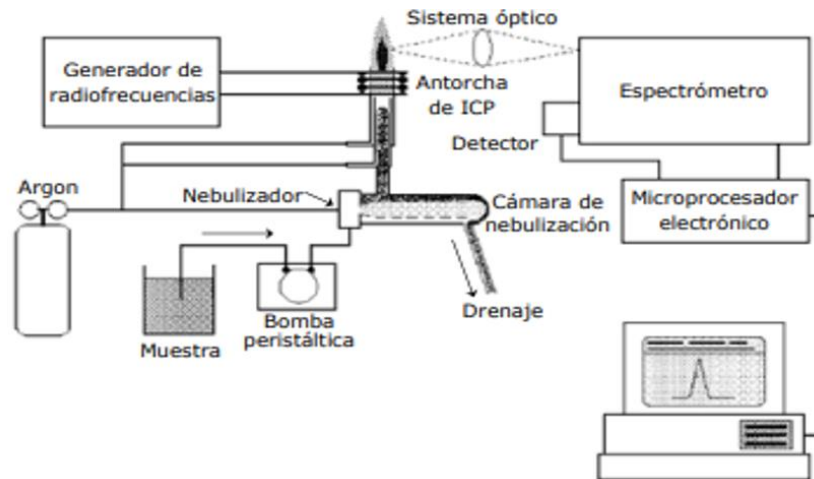
Después del procedimiento de la molienda se saca la granulometría, y este debe ser lo suficiente para poder exponer, por lo menos parcialmente, la superficie del mineral valioso para, posteriormente hacer los análisis dependiendo del tipo de análisis, que se ara muestra proveniente de la molienda, a un tamaño o malla pasante dependiendo del laboratorio y esto va depender del tipo de mineral y de sus características mineralógicas. Las cuales se deben de considerar, para hacer el tiempo de molienda en molino, esto va depender de la dureza del mineral, y la podemos hacer para posteriormente sacar la granulometría en un porcentaje de malla que traspasa (Brito,2017).

### 1.8 ESPECTROSCOPIA DE PLASMA ICP- OES

El objetivo principal de esta técnica, es básicamente identificar dos puntos muy importantes los cuales son: determinar las concentraciones e identificar los elementos, además esta técnica representa a una de las ramas de la espectrometría analítica, que tiene como base la emisión espontanea de radiación de fotones, de átomos y/o iones excitados cuando regresen a su estado fundamental, algo que le caracteriza fundamentalmente a cada elemento es que emite fotones a longitudes de onda específica, en pocas palabras se puede decir que cada uno tiene un espectro de emisión propio, pero cada elemento emite fotones a múltiples longitudes de onda, esta es la técnica del ICP-OES que solo llega seleccionar algunas pocas longitudes, para cada tipo de elemento químico (Fernández, 2008).

El número total de fotones emitidos a una longitud determinada, va directamente proporcional a la concentración de la muestra para cada tipo de elemento químico en

específico, de esta manera se puede determinar y seleccionar, a cada elemento químico en base de donde se emiten, las longitudes de onda del analito o los analitos de la muestra estudiada, midiendo las intensidades que se puede cuantificar e identificar de la composición de la muestra a analizar (Fernández, 2008).



**Figura 4.** Componentes principales de un ICP-OES (Fuente: “ICP-OES e ICP-MS”. Universidad de Alicante).

En la anterior **Figura 4** se puede como es un (ICP-OES) cuales son los componentes principales de este instrumento, las características principales de un (ICP-OES) son las siguientes: La sensibilidad, Precisión, Intervalo lineal, límites de detección, entre otros.

Esta técnica del (ICP-OES), al utilizarse nos ayuda a determinar la concentración de más de 70 elementos desde niveles  $ug L^{-1}$  que es partes por billón (ppb) y hasta lo que es  $mgL^{-1}$  en partes por millón (ppm) (Fernández, 2008).

La Emisión óptica de plasma acoplada inductivamente es la espectrometría (ICP-OES), es una técnica atractiva que sea llevado a muchos análisis a preguntarse si es mejor la técnica del (ICP-OES), o es que mejor la técnica de absorción atómica (AAS), además que una de las ventajas es que es menos costoso que la técnica de (ICP-MS), si bien es



cierto el (ICP-OES) es muy similar con (ICP-MS) pero no es lo mismo, el (ICP-OES) se visualiza y se logra medir en el rango de 165-800 nm., puede ser de manera simultánea o de manera secuencial, esto va depender de la gran medida de los numero de elementos y las concentraciones requeridas, el caso de la forma simultánea puede ser más rápido para un gran número de elementos pero demanda mayor cantidad de costos, el (ICP-OES) puede lograr alcanzar 120 nm. esto es lo que permitirá lograr en la determinación primaria de longitud al Cl con una longitud de onda de 134.664 nm. con límites de detección inferiores a la ppm (Tyler & Yvon,1995).

A pesar de que la técnica de análisis del (ICP-OES), que es una técnica bien establecida, por eso que es que esta técnica es la más utilizada para el análisis multi-elemental, con trazas de varios tipos de muestra, este tipo de análisis también presenta limitaciones, por eso también se recomienda a otros tipos de análisis posteriores (Peña, 2014).

EL método de (ICP-OES) y sus intensidades de emisión va depender en gran medida de la fracción iones átomo que se excitan, mientras que las señales de espectrometría de masas va depender de la ionización, pero no de la excitación, y esto a la vez dependerá de las condiciones dentro del plasma. Por lo tanto, el efecto de los cambios en condiciones experimentales, superposición espectral, las altas temperaturas también pueden conducir a las conclusiones erróneas, de que el plasma no se va ver afectado por la muestra, y en el fondo se conducen a un pequeño límite de detección a menudo se determinan de las magnitudes relativas de la señal y el ruido de fondo, las intensidades de (ICP-OES) son grandes, como se esperaba a altas temperaturas y la emisión de fondo continua, en particular la atribuible a cada tipo de mineral, es relativamente bajo, la principal fuente de los antecedentes continuos en (ICP-OES) son recombinación de electrones e iones,  $M^+ + e^- \rightarrow M + h_p$  o  $M^+ + e^- + e^- \rightarrow M +$



$e^- + h\nu$ ), y se encuentra la pérdida y ganancia de electrones acelerado en un campo de iones llamado “Radiación bremsstrahlung” (Olesik, 1991).

### 1.8.1 Aplicaciones de las técnicas de ICP-OES

Dentro de la aplicación de esta técnica que es el (ICP-OES) tenemos varias, pero aquí solo explicaremos algunas, en base de otras investigaciones, este análisis nos sirve para determinar los elementos químicos que contiene cada muestra.

Utilizaron la Técnica de espectrometría de emisión Óptica con plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), es para la determinación de elementos químicos de tierras raras en este caso, lograron determinar del mineral de “Davidita”, que la muestra es obtenida del sector de Sierra Aspera y Veracruz ubicadas en la tercera región de Chile (Larrea, 2014).

Esta técnica también se aplica para el análisis multi-elemental de los minerales níquelíferos, con el objetivo de saber qué cantidad se tiene en ppm de cada de los siguientes elementos a mencionados, Al, Ca, Co, Cu, Cr, Mg, Mn, Na, Ni, P, Zn y otros de cada tipo de muestra (Peña, 2014).

Esta técnica también es utilizada, para la cuantificación de metales pesados en agua de minería, esta técnica les ayudo a determinar la cantidad de metales o metaloides que se encuentran en cada tipo de agua de cualquier actividad minera, además este estudio se basó con el fin de obtener la cantidad de metales como el manganeso, cromo, molibdeno, cobre y plomo, que se encontraban en este tipo de agua. (Orozco, et al., 2019).



Esta técnica de Espectroscopia de Plasma (ICP- OES), se puede aplicar a distintas áreas de investigación, de las cuales solo nombraremos las más relevantes aquí la cuales son: para análisis de contaminantes medio ambientales, en el estudio de aguas, en el estudio para la agricultura, en los alimentos, en la geología, en la biología, en análisis clínicos, nuevos materiales y entre otros (Fernández, 2008).

## **1.9 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)**

El descubrimiento de esta técnica de rayos X fue en el año de 1895 por el físico de nacionalidad alemana Roentgen, que gracias a esta técnica se han logrado importantes avances en el desarrollo tecnológico del (DRX), que ha permitido incrementar el área de aplicación en la industria en general, la difracción es un fenómeno de dispersión de rayos X en el cual participan todos los átomos que la constituyen al material irradiado, se mencionarán las aplicaciones más importantes del (DRX), como la identificación de una especie de mineral y su diferenciación entre polimorfos, además de la presencia de amorfos (Tuesta, 2013).

En la difracción de rayos X o (DRX) este método se basa en difracción de radiaciones que produce la materia cristalina, el rayo X forma parte del espectro electromagnético, que se encuentra comprendida dentro de los rayos gamma y las radiaciones ultravioleta, esta radiación se trata de pasar los cuerpos opacos a la luz, debido a esto se utiliza, dentro del estudio con los cristalógrafos de Laue y Ewald, ellos descubrieron que estos cristales pueden ser utilizados como rendijas de difracción, de la radiación X esta va presentar unos espaciados reticulares dentro de los planos magnitudes, del mismo orden que la longitud de onda emitida por la radiación X, es por esta razón que los rayos X pueden experimentar un fenómeno de difracción al momento de interactuar con la materia cristalina.

El fenómeno que ocurre en la Difracción de Rayos X no es aleatorio, y va depender de la estructura en la cual incide los rayos X, de la longitud de onda que emitirá la radiación X esta nos dará un ángulo de incidencia de esta radiación sobre la materia cristalina, y por esto predomina “la Ley de Bragg” para el (DRX) que la describimos en la siguiente expresión (Monserrat, 2012).

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta$$

En la Figura 5 se puede mostrar lo que es el modelo de esquema de Bragg donde podemos ver la como la longitud de onda impacta y rebota y proporcionar un ángulo.

La técnica de difracción de rayos X (DRX) en polvo, es una técnica para analizar la estructura y las propiedades microestructurales, esta técnica también se puede emplear para la identificación de fases, la orientación, los parámetros de red, el espaciado implantado, para la identificación de los cristales y la calidad en bases del patrón.

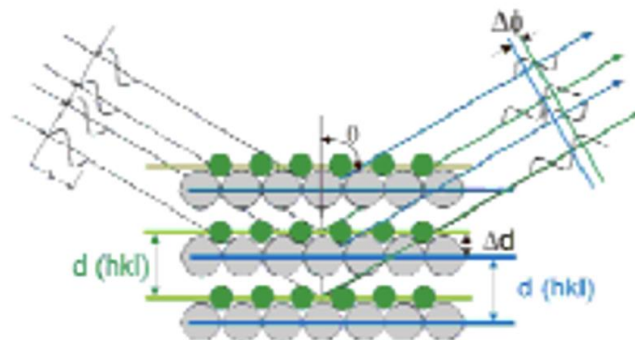


Figura 5. Esquema del modelo de Bragg (Fuente: Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (DRX) en la minería industrial)

### 1.9.1 Usos de la técnica de (DRX)

Dentro de las diferentes aplicaciones del (DRX), se utiliza en las investigaciones geológicas, mineras y metalúrgicas, este análisis nos ayuda a





determinar la muestra en polvo que se logra identificar y cuantificar, en especies minerales, como fases cristalinas mixtas (policristalinas), esta técnica puede ser muy reconocida como convencional por la aplicación fundamental para la caracterización mineralógica en un yacimiento, y saber que minerales predominan en una muestra de yacimiento (Tuesta, 2013).

La difracción de Rayos x se utiliza para la caracterización de materias primas, en los billetes falsos o verdaderos del euro, y saber la diferencia en la composición química, mineralógica y poder sacre le porcentaje mineralógico de cada muestra (Marabello, et al., 2017).

La técnica de difracción de rayos X, se utilizaron para el análisis de veinte huesos de dinosaurios para saber la composición mineralógica, y los procesos diagenicos y tafonómicos para posteriores estudios (Piga, et al., 2012). La técnica de difracción de rayos X se ha utilizado para analizar, identificar y ver las composiciones de las aleaciones, metales, materiales catalíticos, ferroeléctricos y luminiscentes, recientemente este tipo de análisis se ha incorporado para un estudio de materiales utilizados para la nanociencia, como por ejemplo la difracción de rayos X en sistemas nanométricos (Aparicio & Carbajal 2010).

Esta técnica también es aplicada en la industria de la minería, ya que ocupa un lugar importante debido a la información que nos va a proporcionar este análisis para las investigaciones metalúrgicas y geológicas en mineras. Para lograr analizar estas muestras en polvo y que nos ayuda a identificar y cuantificar, las especies de los minerales en fases cristalinas mixtas (policristalinas), las fases amorfas, asimismo nos facilitara información sobre el estado estructural de las

mismas, cada una de estas fases nos ayudara a caracterizar, por las diferentes intensidades relativas y por las posiciones angulares (Tuesta, 2013).

### 1.10 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

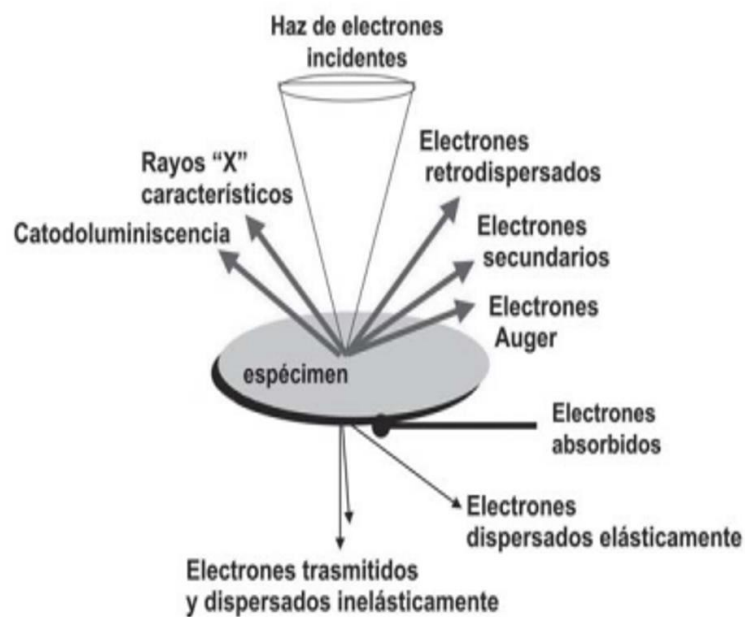
Esta técnica también de Microscopia Electrónica de barrido es conocido como “MEB o SEM”, esta técnica básicamente se basa en la obtención de una imagen, de la muestra a partir del barrido de la misma, con un haz de electrones que nos muestra como resultados de las interacciones entre los electrones y los incidentes con muestra, además el (SEM) se compone básicamente de varios elementos básicos, funciona de tal manera que los diferentes detectores amplifican la señal emitida hacia la superficie cuando esta es barrida por un delgado haz de electrones (Melgarejo, et al., 2010).

Esta técnica nos puede lograr a mostrar los resultados de la observación de la superficie de materiales, pudiendo obtener imágenes de hasta 1000000 de aumento con una resolución de 3nm con una presión variable, El funcionamiento se basa en la incidencia del haz electrónico sobre la muestra conductora, el haz se enfoca en un punto en el que se lleva a cabo el barrido de la superficie, como resultado es la interacción de la emisión de diversas señales (Suárez, et al., 2011).

La técnica de microscopia Electrónica de Barrido convencional (SEM), es una técnica cuyo funcionamiento se basa en el barrido de espécimen, como se puede mostrar en la siguiente **Figura 6**, por medio de un haz de electrones cuyo diámetro se ve disminuido dentro del siguiente rango de 4 nm. hasta 20 nm., esto es debido a las lentes electromagnéticas formadas por el paso de corriente a través solenoides, más conocidos como “bobinas”, después de esto el haz de electrones interacciona con la muestra y se generan varios tipo de señales como se puede mostrar en la Figura 6, las cuales llegan ser colectadas por un detector específico, para que finalmente se pueda producir una imagen

en la pantalla o el monitor de TV, una vez obteniendo estos resultados que es una placa fotográfica o digitalmente puedan ser almacenadas y interpretadas posteriormente (González & Noguez, 2006).

En la Figura 6 se puede mostrar cómo se hace la interacción del haz de electrones primarios, directo con el espécimen que esto nos genera diversos tipos de señales a las que nombraremos: rayos dispersores, Auger, cátodo luminiscencia, rayos X, electrones secundarios y entre otros. Pero también hay otros dos que se utilizan para el “SEM” los cuales son: electrones son absorbidos, transmitidos y difractados (González & Noguez, 2006).

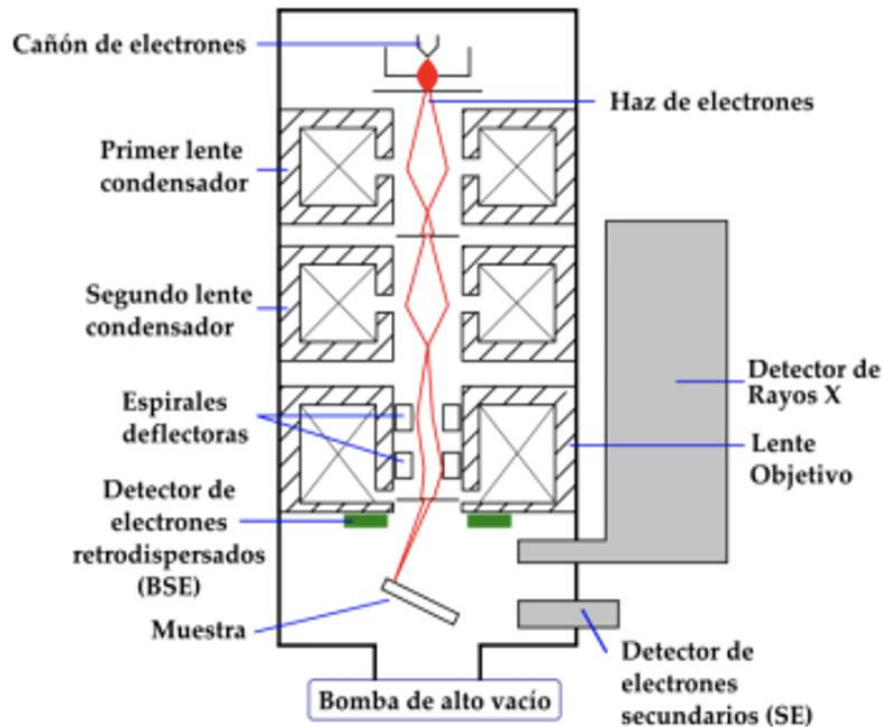


**Figura 6.** Como actúa un Microscopio Electrónico de Barrido convencional (Fuente: Principios de microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X característicos. Universidad Nacional Autónoma de México)

Esta técnica nos sirve para el análisis topográfico, estructural y composicional, la cual se puede utilizar para el estudio de semiconductores, nanopartículas, modificación de algunos productos comerciales, catálisis heterogénea, películas delgadas, fotoelectroquímica, que nos puede permitir en la aplicación de variedad de muestras, para

las necesidades experimentales, y esta técnica se basa en el haz de electrones también conocidos como electrones primarios. El equipo de (SEM) funciona de la siguiente manera tras generar un haz de electrones de alta energía o también conocido como el “EI” que son los electrones incidentes, funciona con un sistema de lentes para poder focalizar el haz y hacerlo incluir sobre la muestra, la cual va a generar a la vez electrones conocidos como electrones secundarios o retro dispersados y se conocen las siglas “SE” y “BSE”, eso es en base a la respuesta del impacto electrónico y que esta se convierte en una señal digital que se interpreta como intensidad de color, para poder construir la imagen y todo esto trabaja al vacío (Penagos, 2013).

En la **Figura 7** se puede mostrar del cómo es el esquema de un Equipo (SEM) y ver por donde ingresa: el cañón de electrones, seguido del haz de electrones, el lente Primario, el lente Secundario, las Espirales deflectoras, el detector de electrones retro dispersados (BSE), la muestra, la Bomba al vacío, detector de electrones secundarios (SE), lente objetico y por último Detector de Rayos X, que se muestra de una forma similar al diagrama de flujo.



**Figura 7.** Esquema de un Equipo SEM (Fuente: Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido)

### 1.10.1 Aplicación es de la Técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Dentro de las aplicaciones tenemos en la medicina, la minería, en la arqueología, en parte de análisis forense, análisis de suelos, para el análisis de impactos ambientales, para la comparación de muestras tomadas de diferentes puntos y entre otro tipo de aplicaciones.

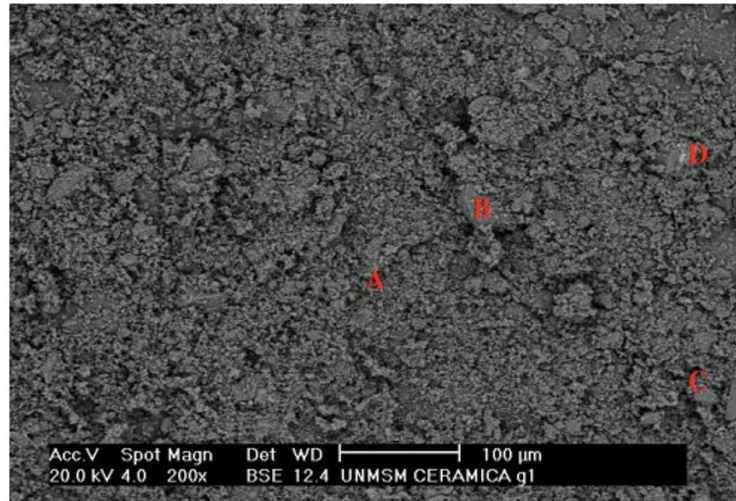
Esta técnica la aplicaron para el estudio de los acabados en cerámica antigua, de Galicia para poder ver la micrografía, y si tiene un espectro EDS-X de complemento nos ayudaría a lograr ver la composición de algunos elementos, ya que para esta prueba se tiene de tal manera que la muestra con mucho más cuidado pueda lograr detectar, pero el (SEM) solo nos muestra una fotografía como se

puede visualizar en la siguiente Figura 8, los resultados de nuestros análisis se mostraran de una manera similar (Lantes-Suárez et al., 2011).

Esta técnica también se puede utilizar en algunas investigación para saber si tiene lepidolita u otro tipo de compuesto o elemento químico, en la cerámica como se puede visualizar en la **Figura 9** donde realizaron el Estudio de (SEM )a 100  $\mu m$  y se obtuvieron esos resultados con los siguientes puntos A,B,C y D (Espinoza, 2008).

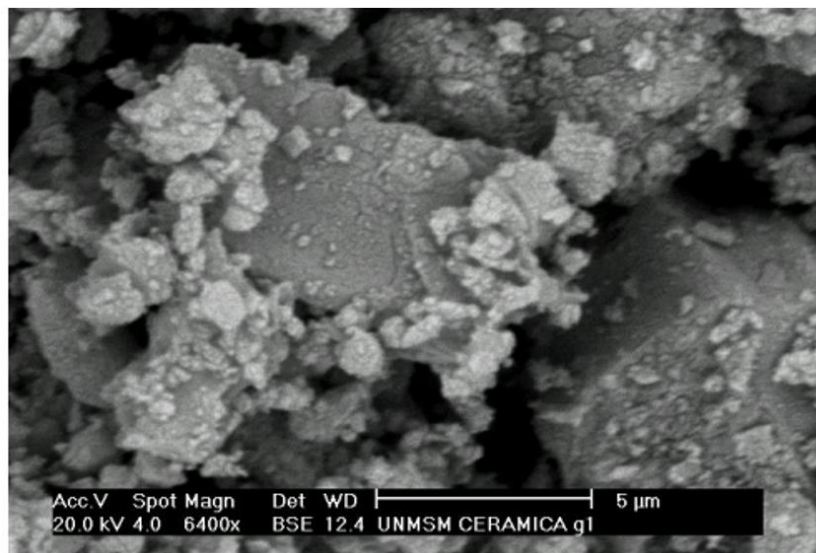


**Figura 8.** Resultado de SEM de cerámica antigua (Fuente: Aplicación de la Microscopía Electrónica de Barrido al estudio de los acabados de cerámica antigua de Galicia)



**Figura 9.** Vista de la Prueba de SEM en 100  $\mu\text{m}$  de una muestra de cerámica (Fuente: Caracterización por técnicas físicas de cerámicas antiguas provenientes de la "Huaca San Marcos", correspondiente al horizonte medio)

Y en la Figura 10 donde se hizo en estudio a 5  $\mu\text{m}$  se puede visualizar que se encuentran los elementos como el Silicio (Si), Oxígeno O, aluminio (Al), Calcio (Ca), Potasio (K) y Hierro (Fe) (Espinoza, 2008).

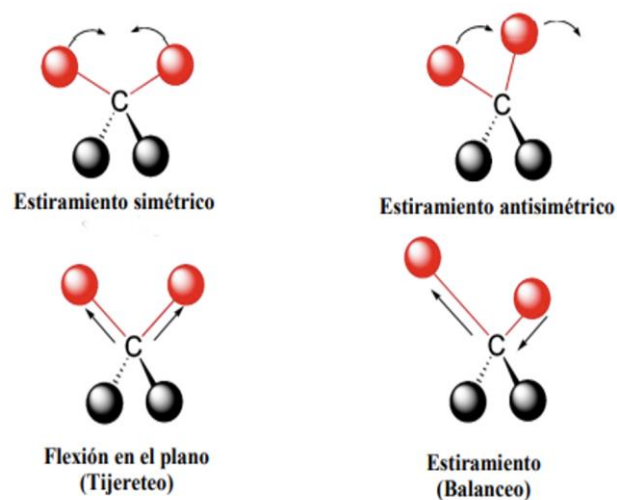


**Figura 10.** Vista de la Prueba de SEM en 5  $\mu\text{m}$  de una muestra de cerámica (Fuente: Caracterización por técnicas físicas de cerámicas antiguas provenientes de la "Huaca San Marcos", correspondiente al horizonte medio)



## 1.11 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

La técnica de espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) esta técnica de análisis consiste en identificar los grupos funcionales, tipos de enlace y conformaciones moleculares, que se encontraran presentes tanto como inorgánicos y orgánicos, en base a la medición de absorbancia de la radiación infrarroja en la gama de longitudes de onda. Al momento de que la molécula va adsorber la radiación infrarroja va cambiar de estado de la energía, debido a la vibración o de rotación que va ir modificando el comportamiento del electrón haciendo que se llegue a estirar, flexione o gire según las leyes cuánticas. En la siguiente **Figura 11** se llega a ver las vibraciones, que pueden implicar un cambio en la longitud del enlace dando lugar a un estiramiento o un enlace de flexión, otros pueden estirarse en fase y llamada como estiramiento simétrico o fuera de la fase, que también se llama estiramiento asimétrico (Molina, 2020).



**Figura 11.** Movimientos comunes en el IR (Fuente: Stuart, 2004)

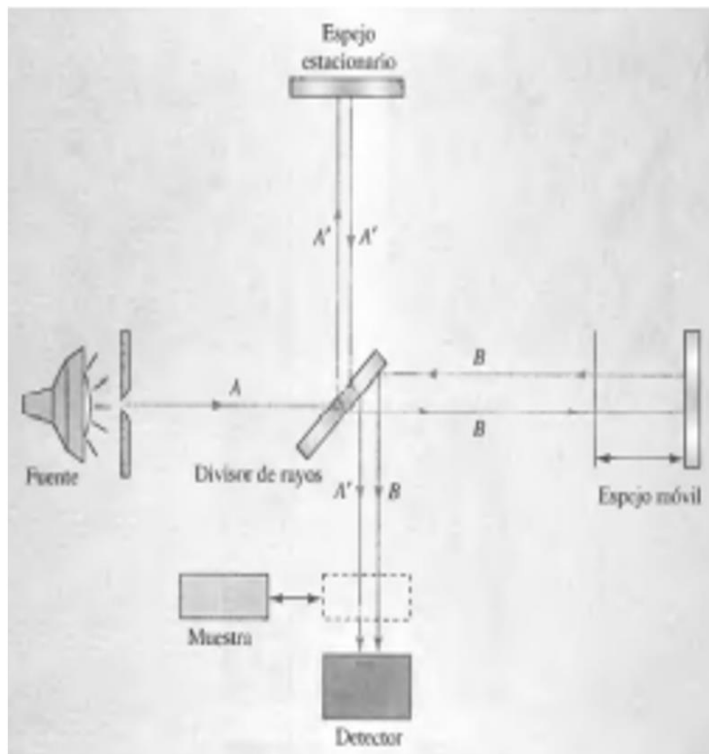
Con el paso de la historia se han diseñado varios tipos de instrumentos que trabajen en el infrarrojo, como pueden ser los espectrómetro, dispersivos, no dispersivos y los fotómetros de filtro, con el pasar del tiempo se fue desplazando por un



instrumento no dispersivo y hoy en día es conocido como: Espectrómetro Infrarrojo de transformada de Fourier y más conocido con las siglas (FTIR), además que es más exacto que las técnicas mencionadas a la inicio de 10 a 200 veces más mejor, que es mucho mejor en la exactitud de la calibración de la longitud de onda, además de carecer de problemas a la dispersión de la luz y de la Emisión IR, este dispositivo tiene una particularidad que se tiene en cuenta con un dispersor de rayos, consta de un espejo parcialmente reflexivo, lo que va permitir que el rayo de la luz incidente sea un parte incidente y la otra reflejada (Navatta, 2013).

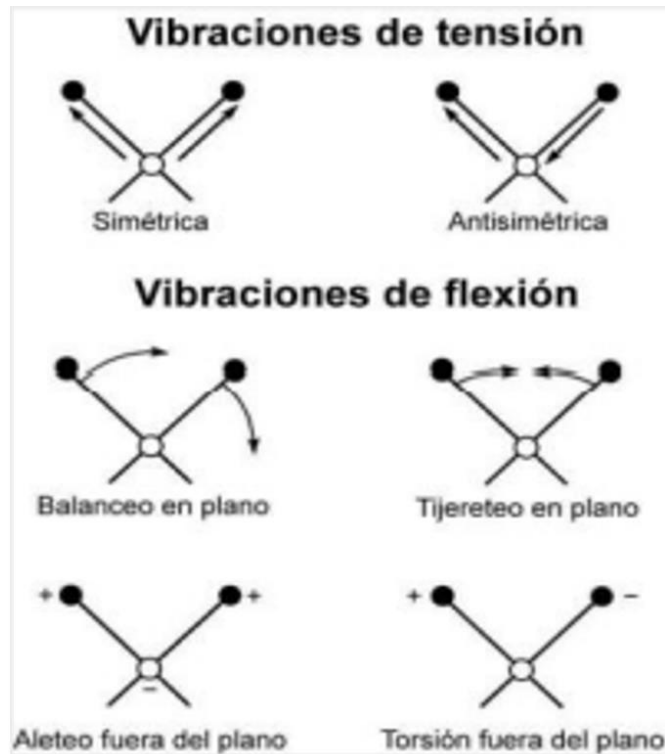
En la **Figura 12** se puede llegar a visualizar la parte del divisor de los rayos, el Interferómetro cuenta con dos espejos (uno móvil y otro estacionario), un detector y una fuente de luz monocromática, o puede ser policromática como se puede llegar a ver en la **Figura 9**, La principal función del Interferómetro es dividir el haz de luz que proviene de la fuente, que va introducir la diferencia de variable en los recorridos, para llegar al detector de manera destructiva o constructiva que esto va dar a un patrón de interferencia (Navatta, 2013).

La técnica de FTIR se puede llegar aplicar en el estudio para el análisis de los alimentos: como por ejemplo en la cuantificación de azúcares y ácidos orgánicos, además también esta técnica nos puede llegar a mostrar la determinación estructural, molecular, entre otros aspectos. De manera sencilla esta nos puede resultar una herramienta muy útil para seguir y explicar los cambios en el producto durante su transformación (Mendoza & Muñoz, 2013).



**Figura 12.** Interferómetro de Michelson (Fuente: Skoog, et al. 2005)

La técnica de la espectroscopia Infrarroja se basa en el hecho de las moléculas tiene la frecuencia la cuales vibran y rotan, los movimientos de rotación y vibración molecular tiene niveles de la energía discretos, dentro de las cuales son las frecuencias vibracionales y resonantes y son determinados por la forma de las superficies de energía potencial molecular, la masa del átomo o de los átomos y asociado eventualmente por el acoplamiento vibracional asociado. Para que se llegue a ser activo el IR la molécula vibracional debe de estar asociada con cambios en el dipolo permanente, las frecuencias resonantes son determinadas por los modos normales que se basa a la energía superficial potencial del estado electrónico de la molécula. En la **Figura 13** se puede llegar a mostrar la diferencia entre las vibraciones de tensión y de flexión, se puede ver los diferentes tipos de vibraciones (Morales & Solis, 2013).



**Figura 13.** Vibración de Tensión y Flexión (Fuente: Morales Ramirez, C., & Solis Casados, D. A. 2013)

En la Tabla 9 se puede mostrar en que longitud de onda trabaja los distintos rangos las tres regiones en las que se divide la región infrarroja excediéndose desde 10 a 14300  $\text{cm}^{-1}$  tenemos las longitudes de onda y los rangos (Rojano, 2020).

**Tabla 9.**

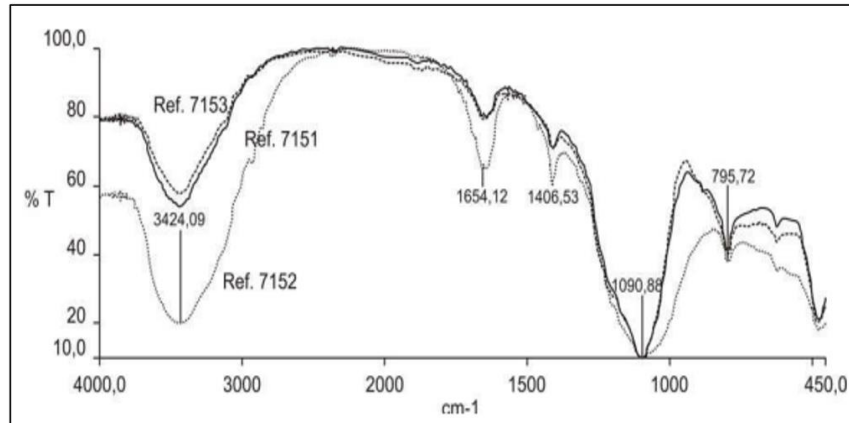
*Longitud de onda para distintos rangos en el infrarrojo*

Región	Transiciones características	Numero de longitud de Onda ( $\text{cm}^{-1}$ )
Infrarrojo Cercano	Sobre tonos y combinaciones fundamentales	14300-4000
Medio (IR)	Vibraciones fundamentales	4000-200
Próximo	Rotaciones	200-10

Fuente: Rojano Molina, M. (2020).

### 1.11.1 Gráficos de los modelos (FTIR)

En los resultados que se encontraron se podrán mostrar una figura similar a la **Tabla 20** en los para poder llegar a interpretar las longitudes de onda que son el porcentaje de transmitancia %T versus la longitud de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )



**Figura 14.** Gráfico de un resultado de FTIR (Fuente Muñoz, A. M., & Díaz, J. G. Caracterización físico-química de los ladrillos constitutivos del puente de arco sobre el río cauca, en popayán, Colombia).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 1.12 MATERIALES UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO

##### 1.12.1 Equipo y materiales

- Chancadora de quijada
- Cuarteador de rifles
- Molino de bolas
- Sacos
- Plásticos
- Cincel
- Combo
- Bolsa para toma de muestra
- Papel para el rotulado
- Balanza digital de kilos
- Balanza de digital gramos
- Recipientes de plástico
- Cronometro
- EPPS de seguridad
- Insumos de limpieza
- Balde con medidor de volumen
- Agua
- Lapiceros



- Palita
- Brocha
- Tablita para el cuarteo
- Sobres y cinta embalaje
- Columna de tamices
- Arena fina
- Alcohol etílico con 70%
- Huaipe
- Columna de tamices
- Equipo de ICP-OES
- Equipo de DRX
- Equipo de Espectroscopia Infrarroja
- Equipo de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)
- Varilla de vidrio
- Probeta
- Balanza digital de gramos
- Lápiz de dureza de punta de tungsteno
- Clavo de cemento
- Cuchillo
- Pedazo de vidrio
- Alambre de cobre
- Agua destilada
- Y otros.

### 1.13 RECEPCIÓN DE MUESTRA

La muestra fue proporcionada por la Empresa Macusani YellowCake de 5 puntos, siendo el peso total de 70 kg de muestra de mineral, los que fueron extraídos de las coordenadas 318368E/8451673N/Zona 19L, a una altura de 4764 m.s.n.m. ubicado en la comunidad de Chacaconiza, del distrito de Corani, provincia de Carabaya de la región de Puno siendo el método de extracción de trinchera a tajo abierto a cada un metro de profundidad. codificación los cuales son 270-A, 270-B, 27-C, 270-P1 y 270-P2. En la siguiente **Tabla 10**, este tipo de codificación se llevará a cabo hasta el final para ver si posteriormente se necesitara otros tipos de análisis.

**Tabla 10.**

*Código de muestra de litio*

Muestra	Código de LAS	Código de Slab	Código de muestra	Cantidad requerida para el análisis de los minerales
1	MN21011939	-	270-A	200 a 230 gramos aprox.
2	MN21011940	-	270-B	200 a 230 gramos aprox.
3	MN21011941	-	270-C	200 a 230 gramos aprox.
4	MN21011942	S-3046	270-P1	200 a 230 gramos aprox.
5	MN21011943	S-2581	270-P2	200 a 230 gramos aprox.

Fuente: Elaboración propia

Una vez hecho el rotulado cada bolsa con su respectivo saco, se manda para los procesos de reducción de tamaño para posteriormente poder hacer él envío a los laboratorios, para su análisis respectivo, por otro lado, el mineral restante se utilizó para determinar los análisis físicos para poder hallar la densidad aparente, la dureza, y otros.

### 1.14 REQUERIMIENTO DE LAS MUESTRAS PARA LOS ANÁLISIS

Antes de hacer la preparación de las muestras se tuvo que coordinar con los laboratorios, para saber que malla tenía que pasar la muestra, para realizar los análisis en cada uno de los laboratorios nos pedía pasante malla N° 140 y en otro laboratorio pasante



malla N° 200, para llegar a pasar este número de malla se hizo la molienda un aproximado de 30 minutos aproximadamente como mínimo, para cada muestra y lograra pesar la cantidad mínima de la muestra para cada uno de los análisis, de cada laboratorio ambos laboratorios nos pidieron una muestra representativa no menor a 200 gramos o 0.2 kilogramos, para llegar a esta cantidad se realizó de manera de cuarteo por rifleado, hasta llegar a una cantidad de 200 a 230 gramos de peso para su envío a los laboratorios y para que realicen sus respectivos análisis.

#### **1.14.1 Desinfección de los Equipos a Utilizar**

La desinfección se hace con alcohol etílico al 70% de todos los equipos y utensilios, como por ejemplo al molino de bolas y a la chancadora de mandíbulas, en este caso también se hace una limpieza final solo al molino de bolas con arena fina por unos 30 minutos aproximadamente moliendo, esta desinfección se hace con el fin de que las a reducción de tamaño, para que no se contaminen con anteriores procesos de molienda que utilizaron en el molino de bolas y en la chancadora de mandíbula.

### **1.15 REDUCCIÓN DE TAMAÑO**

#### **1.15.1 Reducción de tamaño manual**

La reducción manual se hace con un cincel y un combo hasta llegar a un diámetro menor a 10 cm., esto debido a que con un mayor diámetro la muestra no podrá ingresar a la chancadora de mandíbulas, y no se podrá hacer la reducción de tamaño debido a que en la chancadora de mandíbulas su mayor abertura es de 10.75 cm de ancho, este proceso se puede visualizar en la **Tabla 21**. Para todas las muestras se hace la primera reducción de tamaño, y posteriormente su respectivo rotulado para mandarlas a la chancadora de mandíbulas, una vez



terminado la reducción de tamaño manual se manda a la chancadora de mandíbulas seguido del molino de bolas para hacer rifleado y finalmente el tamizado



**Figura 15.** Reducción de tamaño manual (Fuente: Propia)

En la **Figura 16** se muestra el mineral de litio después de la reducción de tamaño que pueda entrar a la chancadora de mandíbula y el peso de una de las muestras antes de pasar al siguiente proceso.



**Figura 16.** Peso de la muestra después de la reducción de tamaño manual (Fuente: Propia)

### 1.15.2 Reducción de Tamaño con la Chancadora de Mandíbulas

En la chancadora de mandíbulas el diámetro máximo de la muestra que puede entrar es de 10 cm., de diámetro para su reducción el cual saldrá con un

diámetro menor 1.8 cm., por este proceso pasan todas las muestras y son rotuladas para posteriormente ser enviadas a lo que es el molino de bolas para su pulverización. La chancadora que se utilizó se puede visualizar en la **Figura 17**, junto a las dimensiones de entrada y salida en la entrada con un largo de 17.2 cm se mantiene estable no varía y un ancho de 1.8 cm como máximo y un 0.8 cm de ancho como mínimo a la salida de la chancadora de mandíbula.



**Figura 17.** Chancadora de mandíbulas (Fuente: Propia)

En la **Figura 18** se puede mostrar en resultado obtenido después del proceso de reducción de tamaño de la chancadora de mandíbula, en esta parte se saca una pequeña muestra para poder hallar la densidad aparente, ya que después de este proceso nos dio como resultado una muestra con un diámetro, menor a 1.3 cm diámetro como se puede ver, más adelante con este tamaño de partícula se puede mandar al molino de bolas para su molienda final.



**Figura 18.** Resultado de la chancadora de mandíbula (Fuente: Propia)

### **1.15.3 Reducción de Tamaño con el Molino de Bolas**

En la reducción de tamaño final esta se hace en el molino de bolas en cual se puede mostrar en la **Figura 19**, por otro lado, en la

**Tabla 11** se detalla los tiempos de molienda de las muestras.



**Figura 19.** Molino de bolas (Fuente: Propia)



**Tabla 11.**

*Tiempo de la muestra molida.*

Código de muestra	Tiempo en minutos dentro del molino de bolas
270-A	5:01
270-A	10:09
270-A	15:15
270-A	20:07
270-A	25:03
270-A	30:04
270-P2	30:09
270-P1	02:01
270-P1	04:02
270-P1	06:13
270-P1	08:09
270-P1	10:11
270-P1	12:05
270-P1	30:08
270-P1	50:03

Fuente: Elaboración propia

Para este proceso se hizo con tiempo la primera muestra para ver que se llegue a pulverizar la muestra solo para la muestra 270-A se hizo en ocho tiempos por criterio los cuales son de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 y 50, mientras que la muestra 270-P1 se hizo con otros tiempo al inicio los cuales son 2, 4, 6, 8, 10, 12, 30 y 50 minutos respectivamente, en caso de las otras muestras se hizo de manera directa a 30 minutos respectivamente en un aproximado de tiempo, estos datos se pueden mostrar en la

**Tabla II**, en cada tiempo se tomó una muestra representativa de 200 a 230 gramos aproximadamente, para poder enviar al tamizado y poder hacer los gráficos los cuales se mostraran en el ANEXO E, donde se logra ver con cada color el tiempo que estuvo en la molienda, el porcentaje de malla pasante en micrómetro “ $\mu m$ ” estos gráficos solo se hicieron con los experimentos de las muestras 270-A y 270-P1.

### 1.16 CUARTEADO

Esta se hace con el fin de reducir el volumen de la muestra, de una manera equivalente para este cuarteo utilizaremos solo un método el cual es cuarteo por rifles hasta que lleguemos a un peso aproximado de 200 gramos a 300 gramos, a lo que requerimos para todas las muestras para, y así poder enviar al banco de tamices y sacar una muestra representativa que pasen la malla N°140 y malla N°200, en la **Figura 20** se puede mostrar en el equipo rifle que se utilizó para el cuarteado y como se realizó.



**Figura 20.** Cuarteado por rifleado (Fuente: Propia)

En la



**Tabla 12** se pudo mostrar el peso obtenido de las cinco muestras, al final de la molienda y después del cuarteado de rifles, la cantidad de cada muestra que se hizo el envío a los laboratorios respectivos.

**Tabla 12.**

*Resultados después del rifleado*

Código de muestra	Peso Inicial en kilos	Peso después del rifleado en gramos
270-A	6.05 Kg.	219 g.
270-B	6.03 Kg.	222 g.
270-C	5.85 Kg.	221 g.
270-P1	6.35 Kg.	219 g.
270-P2	5.45 Kg.	220 g.

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido estos resultados se hace el rotulado respectivo, a las muestras para su envío a los laboratorios y también su contra muestra, con esto termina la parte de reducción de tamaño de muestras.

### **1.17 REALIZAR EL ESTUDIO CINÉTICO DE LA MOLIENDA DEL MINERAL DE LITIO AJUSTANDO LOS DATOS EXPERIMENTALES AL MODELO CINÉTICO PROPUESTO POR TOVAROV V.V.**

Para la operación de chancado se seguirá el procedimiento descrito en Ramírez et al., (2009), donde inicialmente la muestra es fracturada en un chancador de Mandíbulas, de tal modo que el 100% del material se encontraba bajo #6 según la norma ASTM, es decir el tamaño de todas las partículas eran inferiores a 3350  $\mu\text{m}$ .

Por otro lado, para la molienda se utilizará los procedimientos descritos en los artículos de Hernández et al., (2020) y Ramírez et al., (2009), para ello se tomará una masa de 10 Kg, el cual se homogenizará y se colocará en el molino de bolas de 1 x 0.5 m de largo y ancho, respectivamente, el experimento se repetirá para dos muestras, una vez que cada una de las dos muestras molidas, se someterán a tamizaje en seco en una serie de tamices (N° malla: 8, 10, 40, 70, 140, 200 y 270), inicialmente se limpiará con aire a presión cada tamiz, luego se tomará su peso con la ayuda de una balanza analítica y a continuación se procederá a ordenar de manera creciente de número de malla los tamices, es decir en la parte superior se colocara la malla 8 y en la parte inferior anterior al fondo,





se colocara la malla 270. La muestra molida se colocará en la parte superior de la serie de tamices y se procederá a ubicarlos en el equipo Rotap para la respectiva clasificación, el tiempo de tamizaje será de 20 minutos.

Finalmente se pesará cada tamiz con la fracción retenida y por diferencia de pesos entre el tamiz con muestra y tamiz vacío se determinará la fracción retenida. Con los datos obtenidos se procederá a realizar las curvas granulométricas y se determinará el P80 en cada tiempo de molienda.

Los modelos para determinar el P80 serán:

### 1.17.1 Modelo Gaudin Schuhmann

Citado en la Tesis Doctoral de Álvarez (2010) que está dada por la siguiente ecuación:

$$y = 100 * \left(\frac{x}{k}\right)^m$$

Siendo: y el % acumulado para un tamaño x, x el tamaño de apertura, k módulo de tamaño, m es el módulo de distribución.

Si tomamos el logaritmo para ambos lados se tiene:

$$\log y = \log 100 + m * \log x - m \log k$$

$$\log y = m \log x + cte$$

Como P y N son constantes, es obvio que la gráfica de log y versus log x será una línea recta de pendiente P.

### 1.17.2 Modelo Rosin Rammler

Citado en la Tesis Doctoral de Álvarez (2010) que está dada por la siguiente ecuación:



$$R = 100 * e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^m}$$

Donde: R el % acumulado para un tamaño x, e la base del logaritmo, x el tamaño de apertura, k módulo de tamaño, m es el módulo de distribución.

Tomando logaritmo a ambos lados se tiene:

$$\log \log \left( \frac{100}{R} \right) = m' * \log x + cte$$

Los parámetros de distribución del modelo de Rosin-Rammler (m' y k') se obtienen de la pendiente de la línea recta.

### 1.17.3 Modelo cinético de Tovarov V.V.

El modelo cinético de Tovarov V.V. se utiliza para estudiar la cinética de molienda en minerales de litio. Este modelo se basa en la teoría de la molienda por atrición, que sugiere que la reducción del tamaño de partícula de los minerales se produce por la rotura de la partícula en contacto con el medio de molienda

Se utilizará el modelo cinético citado en Ramírez et al., (2009) el cual utilizó para determinar la cinética de molienda de minerales de cromita, donde el modelo se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = -kQ$$

donde: Q es la masa retenida de clase gruesa en el tiempo (t). t es el tiempo de duración de la molienda. k es el coeficiente constante que depende de las condiciones de molienda. Integrando la ecuación, se tiene:

$$\int (dQ/Q) = -k \int dt + C$$

Resolviendo se tiene:



$$\ln Q = -kt + C$$

Evaluando en el momento que inicia, cuando  $t = 0$ , la masa gruesa es  $Q = Q_0$ ; por consiguiente, se tiene:

$$C = \ln Q_0$$

$$\ln Q = -kt + \ln Q_0$$

Quedando finalmente:

$$Q = Q_0 * e^{-k*t}$$

donde:  $Q_0$  es la masa de la clase gruesa que ingresa para ser molida,  $Q$  también puede ser expresada en % de  $Q_0$ .

## 1.18 ANÁLISIS APLICADOS A LA MUESTRA

### 1.18.1 Análisis Físicos a la Muestra

Para estos tipos de análisis físicos se encuentran la dureza, el color, el color de la raya, la densidad aparente y granulometría solo se tomó en cuenta este tipo análisis físicos en cuenta para la muestra.

#### 1.18.1.1 Análisis de dureza

La dureza se hace de forma comparativa para poder determinar, la dureza aproximada del mineral en comparación con la escala de mosh.

#### 1.18.1.2 Análisis de Color

En este análisis solo se necesita un pedazo de cerámica o porcelana, para hacer una raya con el mineral y se pudo de qué color va ser la raya.



### **1.18.1.3 Análisis de Densidad Aparente**

Este análisis es fundamental y se necesario, se tiene que realizar como un mínimo de 4 prueba pasa sacar la densidad aparente aproximada, y hallando el volumen de manera experimental con el peso, y aplicando la fórmula de la densidad es igual a peso sobre volumen, nos va dar el valor de la densidad aparente para posteriormente hallar el promedio y poder considerar a este dato como la densidad aparente en promedio.

### **1.18.1.4 Análisis de la granulometría del tamizado**

En esta prueba se necesita de un equipo de laboratorio, con una muestra representativa de aproximadamente 200 gramos para poner al banco de tamices y poder en cada número de malla cuanto se retiene y poder hacer un gráfico.

### **1.18.2 Análisis de Espectroscopia de Emisión Atómica (ICP-OES)**

Se envió una porción de las cinco muestras de aproximadamente 220 gr. de cada una respectivamente para el análisis (ICP-OES), a Laboratorios Analíticos del Sur que se encuentra en la ciudad de Arequipa, a donde se hizo él envió las cinco muestras que llegaran a pasar malla 200 en grado de granulometría, para que posteriormente en este laboratorio hagan la preparación es esta muestra para el análisis de (ICP-OES), y nos pueda brindar las partículas por millón, (ppm) de litio de las cinco muestras enviadas.

Solo a la muestra 270-C se hizo lo que es el análisis de los siguientes elementos mencionados: Arsénico, Uranio, Plata, Aluminio, Boro, Bario, Belirio, Bismuto, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Galio, Indio, Potasio,



Magnesio, Manganeso, Molibdeno, Sodio, Níquel, Fosforo, Plomo, Antimonio, Selenio, Estaño, Estroncio, Telurio, Titanio, Talio, Vanadio, Zinc, Mercurio, de sus partículas por millón ppm.

### **1.18.3 Análisis de difracción de rayos X (DRX)**

Para este análisis se envió la Muestra 270-P2 a la ciudad de Lima al laboratorio Sistema de servicios y análisis químicos S.A.C. (SLab), la muestra ya recogida con los resultados de la ciudad de Arequipa, para su posterior análisis con la técnica de difracción de rayos X (DRX) se envió una porción de 200 gramos aproximadamente para este análisis, este análisis nos servirá para saber la mineralogía de la muestra enviada.

### **1.18.4 Análisis de Espectroscopia Infrarroja (FTIR)**

Para este Análisis también se envió al mismo laboratorio de lima Slab, con una cantidad de 200 gramos aproximadamente de muestra 270-P2 para el análisis de espectroscopia infrarroja, es lo que requirió el laboratorio, los resultados de este análisis nos ayudara para para saber la caracterización química de la muestra enviada.

### **1.18.5 Análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)**

Para este análisis se envió al mismo laboratorio en la ciudad de Lima Slab con una cantidad de muestra de un aproximado de 200 gramos del código de muestra 270-P1, para su posterior análisis en Microscopia Electrónica de Barrido, este método nos ayudara para saber la morfología de la muestra.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 1.19 DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA DEL MINERAL DE LITIO

La determinación de la cinética de molienda del mineral de litio es fundamental en los procesos metalúrgicos, ya que de ella depende la facilidad de extracción del litio. La preparación del mineral es importante para el proceso de flotación, ya que de ella depende la molienda del mineral y su grado de liberación. Además, la determinación precisa de los minerales huésped es primordial, ya que de ello depende el manejo de materiales durante los procesos de trituración. En resumen, la cinética de molienda del mineral de litio es importante para la extracción del litio y para el proceso de flotación, y su determinación precisa es fundamental para el manejo de materiales durante los procesos de trituración.

##### 1.19.1 Modelo cinético de distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann

Para el cálculo de la cinética de molienda del mineral de litio, se utilizó 07 tamaños de malla ASTM número 270, 200, 140, 70, 40, 10 y 8, con los siguientes tamaños (mm) 2500, 2000, 425, 212, 106, 75 y 53, respectivamente, los tiempos de molienda fueron de: 00 min (base – M1), 5 min (M2), 10 min (M3), 15 min (M4), 20 min (M5), 25 min (M6), 30 min (M7), 40 min (M8) y 50 min (M9), los que se detallan en la



**Tabla 13** que se muestran a continuación.

**Tabla 13.***Datos de molienda en masa (g) para diferentes tiempos (min).*

Tamiz	Tamaño (mm)	M1 (00 min) Masa	M2 (05 min) Masa	M3 (10 min) Masa	M4 (15 min) Masa	M5 (20 min) Masa	M6 (25 min) Masa	M7 (30 min) Masa	M8 (40 min) Masa	M9 (50 min) Masa
8	2500.00	963.13	658.2	623.19	452.95	415.52	258.58	151.05	52.78	22.25
10	2000.00	23.54	27.44	26.72	17.58	12.47	5.7	3.11	2.53	0.15
40	425.00	106.32	183.49	225.95	189.49	217.65	123.18	66.35	18.34	3.16
70	212.00	21.88	57.09	96.08	118.35	221.95	207.55	211.09	284.12	74.83
140	106.00	14.41	44.77	76.23	104.41	170.74	198.91	233.07	481.95	513.46
200	75.00	6.13	17.99	36.75	56.98	100.98	96.25	105.28	498.06	252.52
270	53.00	4.74	53.56	101.35	123.12	190.02	216.76	77.45	113.48	252.89
Base		14.68	15.87	13.1	11.99	38.91	14.78	185.43	10.74	41.68
		1154.83	1058.4	1199.4	1074.9	1368.2	1121.7	1032.8	1462	1160.9

Fuente: Elaboración Propia

Se tiene la ecuación del modelo de distribución de Gates – Gaudin – Schuhmann:

$$F(x) = 100 * \left(\frac{x}{x_0}\right)^\alpha$$

Linealizando la ecuación:

$$\text{Log } F(x) = \alpha * \text{Log } (x) + \text{Log} \left(\frac{100}{x_0^\alpha}\right)$$

Al simplificar la ecuación se tiene:

$$Y = m(x) + b$$

Posteriormente, para el ajuste con el modelo cinético de distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann se determinó la masa retenida, el porcentaje de masa retenida  $f(x)$ , el porcentaje de masa acumulado  $G(x)$  y el porcentaje acumulado pasante  $F(x)$ . Los que se detallan en la **Tabla 14** para el tiempo 00 (base-M1), en los anexos se detallaran los análisis para el resto de tiempos de molienda, sin embargo, se tiene la tabla BBBB donde se detalla los valores de la pendiente ( $\alpha$ ), fracción inicial ( $x_0$ ) y el valor del coeficiente de correlación (R).



**Tabla 14.**

*Datos de los cálculos del modelo cinético de distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann para un tiempo 00 (mineral base de chancado)*

Apertura (mm) (x)	Masa retenida	f(x) Retenido %	F(x)	X = Log(x)	Y= Log(Fx)	X*Y	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
13300	0	0.000	100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2500	963.130	83.400	16.600	3.398	1.220	4.146	11.546	1.489
2000	23.540	2.038	14.561	3.301	1.163	3.840	10.897	1.353
425	106.320	9.207	5.355	2.628	0.729	1.915	6.908	0.531
212	21.880	1.895	3.460	2.326	0.539	1.254	5.412	0.291
106	14.410	1.248	2.212	2.025	0.345	0.698	4.102	0.119
75	6.130	0.531	1.682	1.875	0.226	0.423	3.516	0.051
53	4.740	0.410	1.271	1.724	0.104	0.180	2.973	0.011
Base	14.680	1.271	0.000					
	1154.830	100.000		17.278	4.326	12.457	45.354	3.844

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la pendiente de los datos de molienda, se los obtendrá de la siguiente ecuación:

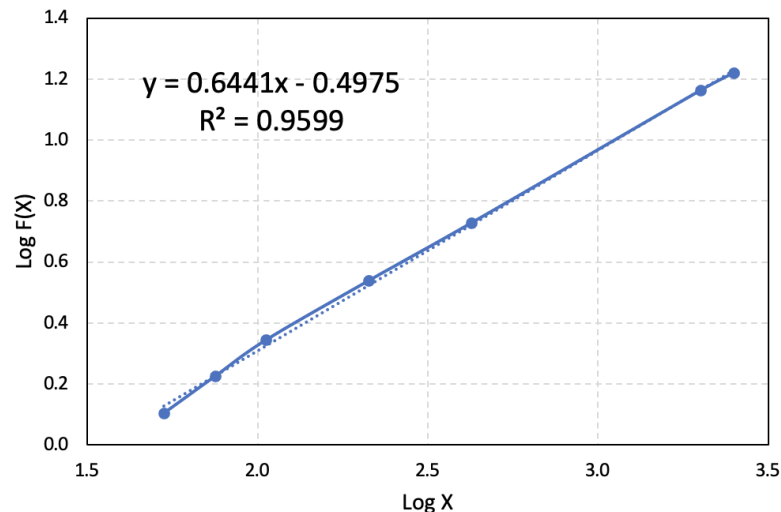
*Pendient4*

$$te = \frac{8 * \sum X_i * Y_i - \sum X_i * \sum Y_i}{8 * \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$Pendiente = \frac{8 * 34.321 - 17.278 * 13.523}{8 * 45.354 - 17.278^2}$$

$$Pendiente = 0.6574$$

También, estos valores pueden ser determinados gráficamente al graficar en el eje x el Log (x) y en el eje y el Log (Fx), obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 21.** Determinación grafica de la constante de distribución ( $\alpha$ ) y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), para el mineral base de litio.

En la Tabla 15 se resumen el tiempo de molienda, la constante de distribución ( $\alpha$ ) y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), para los tiempos de 00 min (base – M1), 5 min (M2), 10 min (M3), 15 min (M4), 20 min (M5), 25 min (M6), 30 min (M7), 40 min (M8) y 50 min (M9).

**Tabla 15.**

*Datos de la constante de distribución y el coeficiente de correlación para el mineral de litio para diferentes tiempos de molienda*

Tiempo (min)	Constante de distribución ( $\alpha$ )	Coefficiente de correlación ( $R^2$ )
00	0.657	0.959
05	0.657	0.959
10	0.701	0.959
15	0.7033	0.959
20	0.599	0.959
25	0.686	0.959
30	0.369	0.959
40	0.877	0.959
50	0.577	0.959
<b>Promedio</b>	0.6473	0.959

Fuente: Elaboración propia

Los datos revelan una variación significativa en la constante de distribución ( $\alpha$ ) del mineral de litio a lo largo de distintos intervalos de tiempo de



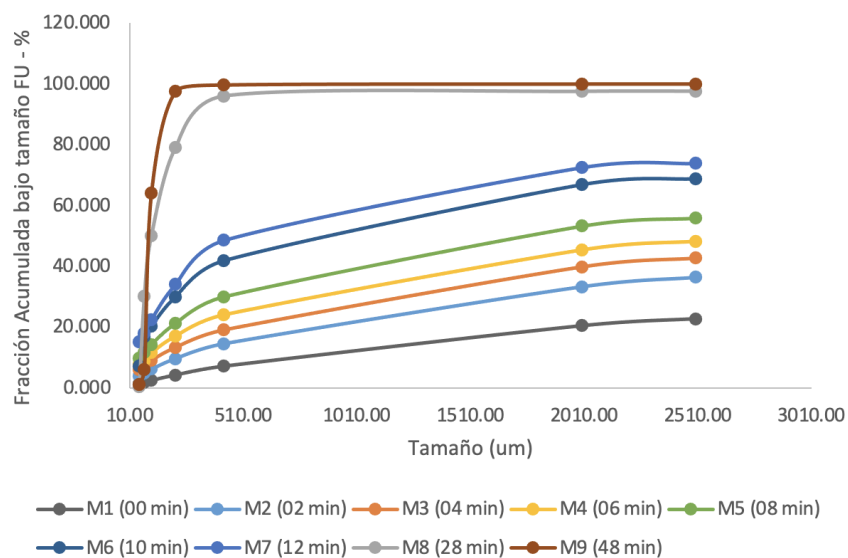
molienda. Se observa una disminución inicial hasta los 30 minutos, seguida de un aumento progresivo en los intervalos de 40 y 50 minutos. Estos cambios indican posibles modificaciones en la distribución de partículas durante las etapas iniciales de molienda, seguidas de una estabilización o incluso una reversión en etapas posteriores.

La constante de distribución representa la proporción de la sustancia presente en diferentes fracciones granulométricas, siendo crucial para comprender cómo evoluciona la distribución del mineral durante el proceso de molienda y su impacto en las propiedades finales del producto. La interpretación detallada de estas tendencias podría beneficiarse de análisis estadísticos adicionales y la consulta de literatura especializada para contextualizar los resultados en el contexto de la investigación sobre el mineral de litio.

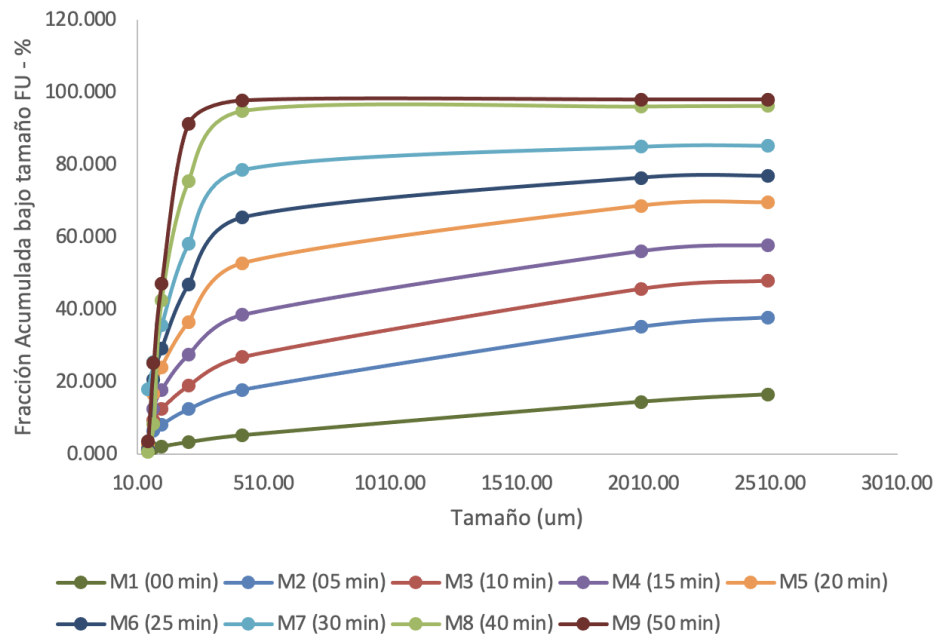
#### **1.19.2 Modelo cinético de distribución de Rosin – Rammler.**

Para el cálculo de la cinética de molienda del mineral de litio, se utilizó 07 tamaños de malla ASTM número 270, 200, 140, 70, 40, 10 y 8, con los siguientes tamaños (mm) 2500, 2000, 425, 212, 106, 75 y 53, respectivamente, los tiempos de molienda fueron de: 00 min (base – M1), 5 min (M2), 10 min (M3), 15 min (M4), 20 min (M5), 25 min (M6), 30 min (M7), 40 min (M8) y 50 min (M9). Por otro lado, se repitió el experimento para los siguientes tiempos, 00 min (base – M1), 2 min (M2), 4 min (M3), 6 min (M4), 8 min (M5), 10 min (M6), 12 min (M7), 28 min (M8) y 48 min (M9). Para ello se determinó la fracción de volumen restante (%) para cada tamaño, posterior a cada tiempo de molienda con se ve en la Figura 22 y Figura 23. Según a la literatura se han probado varios modelos para simular matemáticamente la distribución del tamaño de partícula (PSD) de los

productos de molienda. Estas incluyen las distribuciones Rosin – Rammler (RR). Los resultados indican que la fracción restante de cada tamaño representativo disminuye con el aumento del tiempo de molienda y los datos experimentales pueden expresarse mediante la ecuación de Rosin Rammler:  $F = 100 - 100 * e^{-\left(\frac{d}{b}\right)^n}$  donde d es el tamaño de apertura de la partícula, F es la masa o el volumen (en %) más fino que el tamaño d, b es el módulo de tamaño, que confirma que la molienda del mineral volcánico de litio exhibe un comportamiento que no es de primer orden y la tasa de reducción de cada tamaño es dependiente del tiempo.



**Figura 22.** Fracción restante (% de volumen) para siete tamaños representativos frente al tiempo de molienda del experimento 1.



**Figura 23.** Fracción restante (% de volumen) para siete tamaños representativos frente al tiempo de molienda del experimento 2.

Los resultados indican una variación significativa en  $d_{80}$  en diferentes tiempos de molienda, desde  $28267 \mu\text{m}$  en el tiempo 0 hasta  $597 \mu\text{m}$  en el tiempo 28 minutos. Se observa que la eficiencia de molienda aumenta con el incremento del tamaño de partícula, lo que sugiere una relación directa entre la velocidad de molienda y la eficiencia. La variación en los valores de  $R^2$  refleja la calidad del ajuste del modelo RR a los datos experimentales, destacando la importancia de comprender la cinética de molienda para optimizar la eficiencia en la producción de mineral de litio.

La velocidad de molienda aumenta cuando existe presencia de partículas de mayor tamaño, se detalla en la



**Tabla 16.**

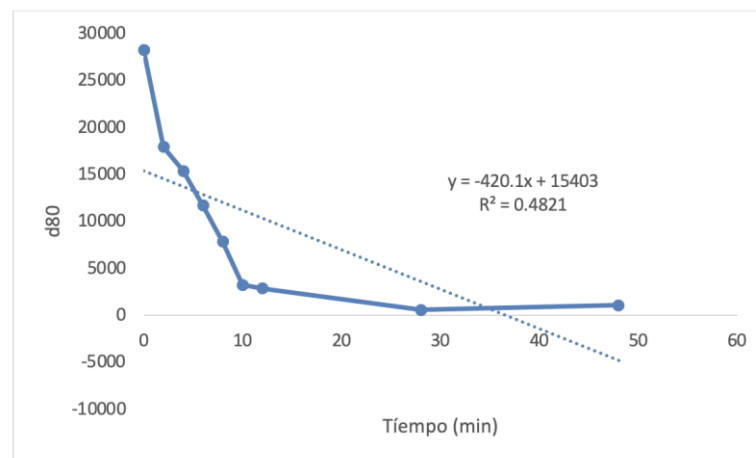
**Tabla 16.**

*D80 de las muestras del mineral de litio.*

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
<b>min</b>	0	2	4	6	8	10	12	28	48
<b>d80</b>	28267	17967	15390	11725	7864	3276	2872	597	1097
<b>R2</b>	0.9994	0.999	0.9996	0.997	0.997	0.928	0.987	0.570	0.314

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 24** se muestra la variación del d80 con el tiempo de molienda con el experimento.



**Figura 24.** Gráfico de d 80 v/s Tiempo, a medida que aumenta el tiempo, los valores de P80 tienden a disminuir, lo que significa que se está reduciendo el mineral debido a la molienda

### 1.19.3 Modelo cinético de Tovarov V.V.

De acuerdo al modelo cinético citado en Ramírez et al., (2009) el cual utilizó para determinar la cinética de molienda de minerales de cromita, donde el modelo se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = -kQ$$

donde: Q es la masa retenida de clase gruesa en el tiempo (t). t es el tiempo de duración de la molienda. k es el coeficiente constante que depende de las condiciones de molienda. Integrando la ecuación, se tiene:

$$\int (dQ/G) = -k \int dt + C$$

Resolviendo se tiene:

$$\ln Q = -kt + C$$

Los datos obtenidos en la molienda para finos y gruesos se detallan en la

**Tabla 17.**

**Tabla 17.**

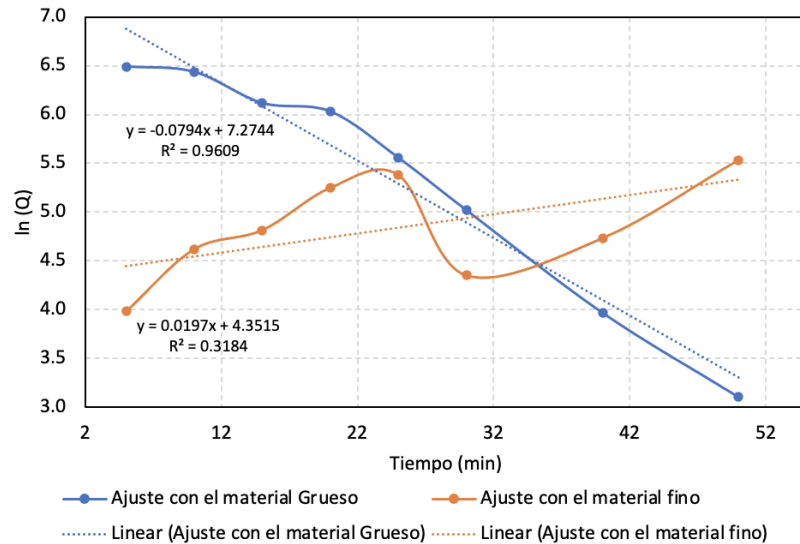
*Distribución de tamaño de partícula fina y gruesa del mineral de litio.*

Tiempo (min)	Tamaño grueso	Tamaño fino	ln (Q) Grueso	ln (Q) Fino
0	963.13	4.74	6.870	1.556
5	658.2	53.56	6.490	3.981
10	623.19	101.35	6.435	4.619
15	452.95	123.12	6.116	4.813
20	415.52	190.02	6.030	5.247
25	258.58	216.76	5.555	5.379
30	151.05	77.45	5.018	4.350
40	52.78	113.48	3.966	4.732
50	22.25	252.89	3.102	5.533

Fuente: Elaboración propia

Con los datos de la **Tabla 17**, se elabora el siguiente gráfico con el fin de determinar los parámetros cinéticos con un ajuste de logaritmo natural al tamaño de partícula fina y gruesa, se obtiene la siguiente **Figura 25**.





**Figura 25.** Linealización de los datos experimentales de molienda del mineral de litio.

Haciendo una correlación de la ecuación obtenida del ajuste de la curva de molienda de grueso con la ecuación propuesta por Tovarov V.V., se obtiene la constante cinética de la molienda del mineral de litio (**Tabla 18**).

**Tabla 18.**

*Valores de las constantes cinéticas del modelo Tovarov V.V.*

Constante cinética	Para mineral fino	Para mineral grueso
<b>k</b>	0.0197	0.0794
<b>C</b>	4.3515	7.2744

Fuente: Elaboración propia

Según la **Tabla 18**, la constante cinética "k" para el mineral grueso es mayor que para el mineral fino, lo que indica que la velocidad de formación de la interfase sólido-líquido es mayor para el mineral grueso. Además, la concentración de soluto en la fase líquida es mayor para el mineral grueso que para el mineral fino, lo que indica que la molienda del mineral grueso requiere una mayor cantidad de energía para lograr la misma concentración de soluto en la fase líquida que la molienda del mineral fino.

Finalmente, la ecuación que describe la cinética de la molienda del mineral de litio es:

$$Q = Q_0 * e^{-0,4069*t^{0,2966}}$$

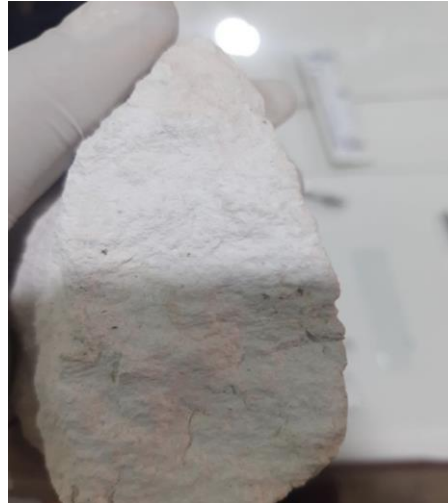
Con lo que se podrá determinar la molibilidad del mineral de litio en un tiempo asignado, en las condiciones dadas en los experimentos de la tesis.

## **1.20 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MINERAL DE LITIO DE MACUSANI – PUNO**

El litio de Macusani, en la región de Puno, Perú, es un recurso importante debido a sus grandes reservas, que lo sitúan como el sexto mayor yacimiento del mundo. Este yacimiento se encuentra en su mayoría mezclado con reservas de uranio, lo que dificulta su extracción por cuestiones ambientales. El litio se presenta en forma de espodumena, un mineral incoloro, amarillo o verde claro. Además, se ha encontrado que el litio de Macusani contiene una gran cantidad de potasio y cesio, lo que lo hace aún más valioso. En base a ello, se analizó las características físicas siguientes:

### **1.20.1 Color**

Para la identificación del color del mineral de litio tiene un color blanco similar al color del yeso casi que tiende a un color grisáceo claro, se hace una manera visual y en comparativa con otras fotografías de este tipo de mineral como se puede visualizar en la siguiente **Figura 26**.



**Figura 26.** Muestra del mineral de litio de Macusani - Puno (Fuente: Propia).

Estos resultados concuerdan con los datos del “Manual de mineralogía” publicado en el año de 1997 ya en esta publicación nos da a conocer el color de la lepidolita que se presenta de dos colores las cuales son: de color lila o de color blanca, este tipo de mineral siempre está acompañado de óxido de silicio o también conocido como cuarzo ( $SiO_2$ ) (Klein & Hurlbut, 1997).

### **1.20.2 Color de Raya**

Para poder determinar el color de la raya se hace de una manera experimental con una cerámica o mayólica, esto se procede de manera experimental solo con pasar por uno de los bordes el mineral y ver que raya se obtiene para poder rayar en este caso se utiliza un pedazo de mayólica que es color naranja al borde y de frente color blanco brillantes para ver el color de raya de la muestra, claramente se puede mostrar en la **Figura 27** de qué color se obtuvo la raya que es de color blanca al igual que el mineral.



**Figura 27.** Color de raya del mineral (Fuente propia).

El color de raya en la mayoría de minerales está bien determinado esto se puede ver en el “Manual de mineralogía” donde nos dan de varios minerales sus características físicas tal como son: la dureza, el color, la densidad, el color de raya y otros, en este libro nos dice que el color de la raya de lepidolita es de color blanco grisáceo, rosa o lila y en el caso del cuarzo su raya es blanco lechoso (Klein & Hurlbut, 1997).

En comparación a los resultados que se encontraron se asemejan mucho a los que se encontraron en el manual de mineralogía ya que tanto como la lepidolita tiene una raya de color blanco con un poco de rosa o lila según el manual y el cuarzo tiene una raya de color blanco lechoso entonces coinciden con nuestro color de raya que encontramos el cual se muestra en la **Figura 27**.

### **1.20.3 Dureza**

La dureza se realizó de una manera comparativa con la escala de mosh de 1 al 10 de dureza utilizando las rayaduras de dureza empezando hacer el rayado

con la uña, alambre de cobre, navaja o cuchillo, clavo de cemento, vidrio y lápiz de tungsteno como se puede visualizar en la **Figura 28**.



**Figura 28.** Determinación de la dureza en la escala de Mosh (fuente: Propia).

Se consideró cuatro puntos los cuales lograron raya a la muestra de mineral los cuales fueron el lápiz de punto de tungsteno, el vidrio, el clavo de cemento y por último el cuchillo o la navaja ya que el resto no logro rayar a la muestra, pero solo se consideró al primer punto y los cuatro que lograron rayar y todo esto se puede visualizar en la figura 23 y están enumeradas en orden del 1 al 5. Después de todo se llegó a la conclusión de que tiene una dureza de 5.5 a 6 en la escala de Mohs aproximadamente debido a que, si llegaron a rayar desde la navaja o cuchillo, el clavo de cemento, el vidrio y el lápiz de punta de tungsteno.

En este caso la dureza del cuarzo es de 7 en la escala de “Mohs”, la ortoclasa una dureza de 6 en la escala de “Mohs” y por último la dureza de lepidolita esta entre 2.5 a 4 en la escala de “Mohs” en este manual de mineralogía esta “H” considerado como la dureza (Klein & Hurlbut, 1997).

En comparación los resultados encontrados de la dureza de la muestra del mineral de manera experimental, se asemejan a la dureza que nos dan en el manual mineralogía y se está considerando dureza de tres minerales los más importantes, las cuales son: la dureza de Lepidolita, la ortoclasa y del cuarzo, los cuales se encontraron en los análisis que se hizo de difracción de rayos X en la siguiente **Tabla 19** se muestra la dureza encontrada más la dureza de los minerales mencionado y su promedio y se ve que se asemejan mucho la dureza encontrada con la dureza en promedio.

**Tabla 19.**

*Comparación de la dureza encontrada con los antecedentes.*

Mineral	Dureza en escala de Mohs
Lepidolita	4
Cuarzo	7
Ortoclasa	6
Promedio	5.666
Muestra	5.5- 6

Fuente: Manual de mineralogía de Dana (1995).

#### 1.20.4 Densidad Aparente

La densidad aparente se encontró de manera experimental con una balanza digital y una probeta y contando con 6 muestras y aplicando la siguiente Ecuación:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}}$$

Para poder hallar el volumen de la muestra se tomará una probeta con 20 ml. de agua destilada, esta se tomará como volumen inicial y luego se inducirá el pedazo de muestra a la probeta, para que esta probeta suba su volumen una vez tenido este volumen se le considera como volumen dos o volumen muestra más agua destilada, y para tener el volumen de la muestra se hará la resta, del volumen de la muestra con agua destilada menos el volumen inicial para que nos de la

diferencia del volumen y tengamos el volumen de cada una de las muestras como podemos ver en siguiente formula.

$$V_{muestra\ mas\ agua} - V_{inicial} = V_{Muestra}$$

Tenemos la información densidad que también conocidos como “peso específico” estos datos se encuentran en el manual mineralogía de la lepidolita, la ortoclasa y el cuarzo en base al manual mineralogía de donde se sacó la información para hacer la **Tabla 20** y poder sacar el promedio de la densidad (Klein & Hurlbut, 1997).

**Tabla 20.**

*Densidades de mineral.*

Mineral	Densidad o peso específico (g/ml)
Lepidolita	2.8
Ortoclasa	2.56
Cuarzo	2.53
Promedio	2.63

Fuente: Manual de Minerología (Klein & Hurlbut, 1997).

De esta manera sabremos el peso de la muestra, el volumen de la muestra y por último podemos hallar la densidad de la muestra la densidad aparente del mineral y los resultados se muestran a la siguiente **Tabla 21**.

**Tabla 21.**

*Resultados de los datos para hallar la densidad aparente.*

Muestra	Peso	Volumen Inicial	Volumen con Muestra	Volumen de la Muestra	Densidad Aparente D=P/V
1	9.1 g.	20 ml	24.5 ml.	4.5 ml.	2.02 g/ml
2	2.9 g.	20 ml	21.5 ml.	1.5 ml.	1.93 g/ml
3	3.0 g.	20 ml	21.8 ml.	1.5 ml.	2.00 g/ml
4	2.5 g.	20 ml	21 ml.	1.3 ml.	1.92 g/ml
5	1.8 g.	20 ml	20.9 ml.	0.9 ml.	2.00 g/ml
6	5.5 g.	20 ml	22.8 ml.	2.8 ml.	1.96 g/ml
Promedio de densidad aparente					1.97 g/ml

**Fuente: Elaboración propia**

De manera experimental se obtuvo los anteriores resultados mostrados en la **Tabla 21**, como se puede mostrar y se puede ver en la **Figura 29** la manera en cual se obtuvo los datos sacando de un maneral experimental con una balanza, una probeta y agua destilada.

Los resultados que se encontraron están cerca de la información que se recabo del manual de mineralogía como son: la densidad de la lepidolita, ortoclasa y el cuarzo a estas densidades se les saca un promedio para tener una densidad promedio cual fue 2.63 g/ml y con el cual vamos a comparar con la densidad aparente hallada el cual fue 1.97 g/ml de manera experimental, la diferencia entre densidades es 0.66 g/ml pero si se acerca tanto la densidad aparente con la densidad teórica.



**Figura 29.** Cálculos del V. y P. para la densidad aparente (Fuente: propia)

#### 1.20.5 Metodología de granulometría

El tamizador que se utiliza para esta prueba es similar a la que se muestra en la **Figura 30**, esto es para ver la granulometría de muestra después de haber pasado por la chancadora, el molino de bolas, y el cuarteo en esta prueba también se hizo con una muestra representativa la cual es la muestra 270-P1 de peso



aproximado 200 a 230 gramos aproximadamente, se hizo solo con una muestra para poder la obtener la **Tabla 22**.



**Figura 30.** Tamizador (Fuente: Internet)

**Tabla 22.**

*Análisis Granulométrico de la muestra*

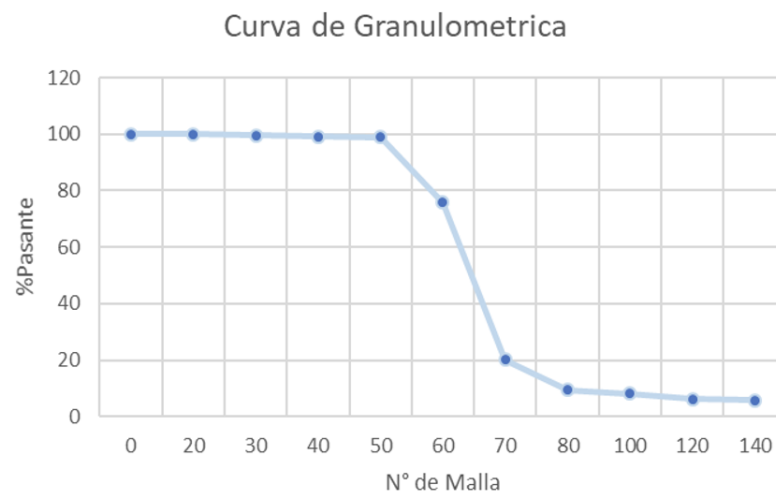
N° del Tamiz	N° de Malla	Peso Retenido en Gramos	% Retenido	% de Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
1	20	0.044 g.	0.02	0.02	99.98
2	30	0.104 g.	0.05	0.07	99.93
3	40	0.540 g.	0.27	0.34	99.66
4	50	1.039 g.	0.52	0.86	99.14
5	60	0.320 g.	0.16	1.02	98.98
6	70	46.330 g.	23.17	24.19	75.81
7	80	111.370 g.	55.69	79.87	20.13
8	100	21.317 g.	10.66	90.53	9.47
9	120	2.657 g.	1.33	91.86	8.14
10	140	3.721 g.	1.86	93.72	6.28
11	Base	0.820 g.	0.41	94.13	5.87

**Fuente: Informe de laboratorio Slab**

En la granulometría se ve que cantidad de la muestra se queda en cada una de las mallas, esto va dependiendo de la cantidad de la granulometría de toda una porción de la muestra en cada una de las mallas este análisis, se envió a un laboratorio para la parte experimental y ver después de una molienda de 30 minutos del mineral, el cuarteo hasta poder llegar una porción de la muestra de aproximadamente de 200 a 230 gramos.

En la **Tabla 22** se puede mostrar: el peso retenido encada malla el porcentaje retenido, el retenido acumulado y por último el porcentaje acumulado se trabajó con 10 tamices o mallas las cuales son de como mínima malla número 20 y por último malla 140, y una base donde llegaran pasar la muestra que pase la malla 140, y con este resultado se puede hacer un gráfico para ver donde se retenido más y menos y en que parte fue mayor.

En la siguiente **Figura 31** se puede visualizar la cantidad de porcentaje pasante en cada malla, se pude visualizar con una muestra representativa de 200 gramos aproximadamente ver, en que malla se logró la mayor retención de toda la muestra con el punto claro está que acaba en la malla 140 este grafico se hizo en base a los resultados obtenidos en la **Tabla 22**.



**Figura 31.** *Curva de granulometría (Fuente: Propia)*

## 1.21 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MINERAL DE LITIO DE MACUSANI – PUNO

### 1.21.1 Análisis del mineral de litio por Espectroscopía de Emisión Atómica (ICP-OES).

Para el análisis de las cinco muestras el laboratorio, solo se aplicó un método el cual es el ensayo para Litio por digestión multi ácida (ICP-OES), para las cinco muestras: 270-A, 270-B, 270-C, 270-P1 y 270-P2 cada una de estas muestras tiene un peso de 220 gramos aproximadamente los resultados obtenidos por el laboratorio, “Laboratorios Analíticos del Sur” se pueden mostrar los resultados de ppm de lito en la **Tabla 23**.

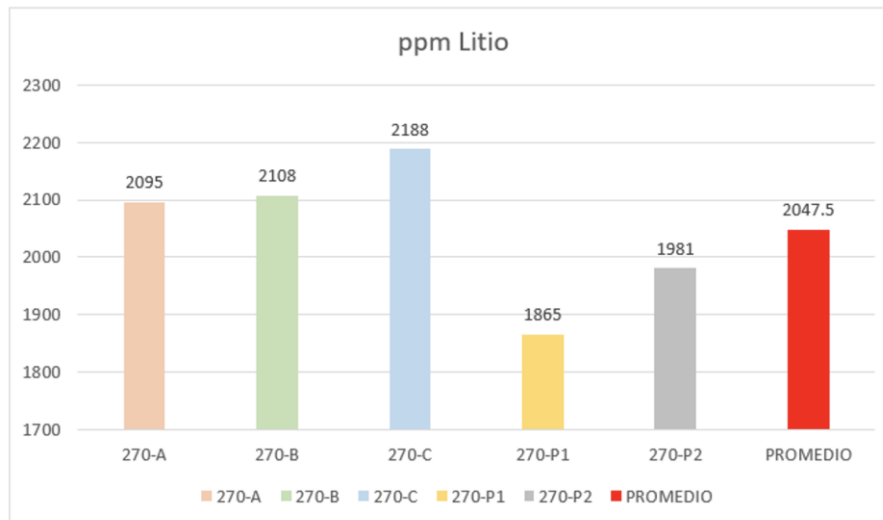
**Tabla 23.**

*Resultados de las cinco muestras en ppm de litio*

<b>Código de muestra</b>	<b>Cantidad de muestra en gramos</b>	<b>Resultados de ppm de litio</b>
<b>270-A</b>	219	2095
<b>270-B</b>	222	2108
<b>270-C</b>	221	2188
<b>270-P1</b>	219	1865
<b>270-P2</b>	220	1981
<b>Promedio</b>	220	2047.4

**Fuente: Laboratorios Analíticos del Sur**

Con los resultados obtenidos podemos hacer la gráfica que se puede visualizar en la **Figura 32**, y ver cuál de las muestras es la que tienen mayor cantidad de ppm en la muestra.



**Figura 32.** Cantidad de ppm de litio en el análisis ICP-OES (Fuente: Propia)

Una vez obtenido los resultados se llega a deducir que si se tiene litio con un promedio de 2047.5 ppm de litio en general por cada muestra de 220 g., pero se puede ver el grafico en la Figura 32 que muestra tiene mayor cantidad de litio en ppm y cual muestra tiene menor cantidad en ppm de litio y el promedio si bien es cierto no todos tiene el mismo peso, pero son por milésimas que se diferencia que no son muy considerables.

En base a los resultados obtenidos de las cinco muestras se procede a ver que la muestra 270-P1 es la que tiene menor cantidad de litio en partículas por millón con una cantidad de 1865 ppm de litio, y en cambio en la muestra 270-C es la que tiene mayor cantidad de litio en partículas por millón con una cantidad de 2188 ppm de litio, y que sacando un promedio de todas la muestra se tiene un promedio de 2047.5 ppm litio considerando todas y haciendo un promedio de las cinco muestras, en base a este resultado se llega a la deducción de que todas las muestras contienen litio en cantidad casi próximas con pequeñas diferencias.

En los resultados encontrados de por Rolo Zapana Yanarico en su investigación de “Extracción De Litio Por Diferentes Métodos De Lixiviación En



Tobas Volcánicas Del Depósito Falchani De Macusani -Región Puno”, se encontraron los siguientes resultados de ley de litio en ppm la cual es 3171 ppm de litio, en una de sus muestras que tiene una alta ley se encontró 3685 ppm de litio con código de muestra “RTOS-21” y en la que se encontró con menos ley es la muestra de código “RTFAL-07” con una ley de 437 ppm de litio, para las dos muestra con código se utilizó la técnica ICP-OES la misma técnica que mi persona utiliza para mis cinco muestras (Zapana, 2020).

Los resultados de mis muestras que se mandó a hacer el análisis ICP-OES, están dentro de los parámetros como baja y alta ley que encontró el señor Zapana, en su investigación y el promedio de la ley mis muestras son de 2047.4 ppm de litio tal como se puede mostrar en la **Tabla 23**.

#### **1.21.2 Análisis para la muestra 270-C en (ICP-OES)**

Este análisis solo se realizó para la muestra 270-C debido a que tiene mayor concentración en partículas por millón de litio, y que esta es de 2188 ppm de litio a diferencia de las otras muestras que son menores como se pudo mostrar en la tabla la **Tabla 23** y en la **Figura 32** de los resultados.

A la muestra 270-C para el análisis, se le aplico diferentes tipos de métodos de ensayo para poder obtener los siguientes resultados los cuales lo nombraremos.

- Método de ensayo para arsénico por ICP-OES
- Método de ensayo para Uranio fusión Alcalina ICP-OES
- Método de ensayo Multi-elemental por ICP-Oes digestión multi acida
- Método de ensayo para mercurio por ICP-OES



Descripción en partículas por millón (ppm) de la muestra pulverizado en la siguiente Tabla 24 se informa los siguientes elementos: Arsénico, Uranio, Plata, Aluminio, Boro, Bario, Belirio, Bismuto, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Galio, Indio, Potasio, Magnesio, Manganeso, Molibdeno, Sodio, Níquel, Fosforo, Plomo, Antimonio, Selenio, Estaño, Estroncio, Telurio, Titanio, Talio, Vanadio, Zinc, Mercurio y por último el más importante el litio solo de la muestra 270-C que se envió al laboratorio para su respectivo análisis y con los resultados poder armar la **Tabla 24** de todos estos elementos ya nombrados y sus resultados en ppm.

En la Tabla 24 se muestran los resultados, de los análisis que se realizó a la muestra enviada al laboratorio, “Laboratorios Analíticos del Sur” donde se realizó el análisis (ICP-OES), nos muestran un resultado optimo y se ve que en esta muestra las partículas por millón de litio son 2188 ppm del total de muestras, junto a esto se puede ver otros elementos que son muy importantes y relevantes, para ver en base a estos resultados ver cómo pueden concentrar, o que metodología es la más óptima para poder concentrar de mejor manera el litio para su futura comercialización, dentro de ellas nombraremos las que tiene mayor concentración como es el potasio (K) y el aluminio (Al) con una cantidad mayor a 10000 partículas por millón en la muestra estas nos pueden complicar para hacer la concentración del litio dependiendo de la técnica que se llegue a aplicar.

**Tabla 24.***Resultados de partículas por millón de la muestra 270-P2 (ppm)*

#	Elemento químico	Símbolo químico	ppm
1	Litio	Li	2188
2	Arsénico	As	12.92
3	Uranio	U	0.046
4	Plata	Ag	10.37
5	Aluminio	Al	>10000
6	Boro	B	<4.1
7	Bario	Ba	22.2
8	Belirio	Be	25.68
9	Bismuto	Bi	<0.5
10	Calcio	Ca	668.3
11	Cadmio	Cd	0.934
12	Cobalto	Co	0.54
13	Cromo	Cr	36.76
14	Cobre	Cu	8.047
15	Hierro	Fe	2977
16	Galio	Ga	<0.41
17	Indio	In	<0.10
18	Potasio	K	>10000
19	Magnesio	Mg	735.1
20	Manganeso	Mn	484.6
21	Molibdeno	Mo	0.61
22	Sodio	Na	6566
23	Niquel	Ni	38.23
24	Fosforo	P	908.97
25	Plomo	Pb	499.59
26	Antimonio	Sb	3.36
27	Selenio	Se	<0.16
28	Estaño	Sn	<4
29	Estroncio	Sr	47.83
30	Telurio	Te	<0.21
31	Titanio	Ti	180.29
32	Talio	Tl	4.83
33	Vanadio	V	312.25
34	Zinc	Zn	2201
35	Mercurio	Hg	4.00

Fuente: Laboratorios Analíticos del Sur

Otros elementos que con una cantidad de ppm casi cercana a la de litio son los siguientes elementos con unas concentraciones muy cercanas, el Zinc (Zn) con 2201ppm, el Sodio (Na) con 6566 ppm, el Hierro con 2977ppm y por último el fosforo con 908.97ppm.



En los resultados encontrados de la investigación de “Extracción De Litio Por Diferentes Métodos De Lixiviación En Tobas Volcánicas Del Depósito Falchani De Macusani -Región Puno”, donde el realizo un análisis multi-elemental con ICP-OES en la muestra “RTOS-21” muestran los siguientes resultados Aluminio 8.03 ppm, Belirio 105.0 ppm, Calcio 0.11 ppm, Cromo 89.0 ppm, Cesio 382 ppm, Hierro 0.48 ppm, Potasio 3.11 ppm, Magnesio 0.02 ppm, Manganeso 576 ppm, Molibdeno, Sodio 2.35 ppm, Fosforo 0.24 ppm, Rubidio 1432 ppm, Azufre 0.02 ppm, Estaño 77.4 ppm, Uranio 10.90 ppm, Wolframio 83.5 ppm, Zinc 143.0 ppm y por último el más importante el litio 3.658 ppm (Zapana, 2020).

Tras a ver comparado su análisis multi-elemental del señor Rolo Zapana de su muestra “RTOS-21” con mi muestra se ven varias similitudes y diferencias con mi muestra que 270-C que también se hizo un análisis multi-elemental ICP-OES un claro ejemplo esta que en sus resultados el señor Rolo Zapana no sale la cantidad en ppm de los siguientes elementos: Plata, Arsénico, Boro, Bario y otros elementos más, al ser comparado desde mi punto de vista mi resultado de ICP-OES multi-elemental, está más completo, esto es bueno ya que con estos resultados podemos ver que otros elementos químicos tiene para posteriormente recomendar que tipo de proceso es el más adecuado para la concentración de litio y la más optima.

## **1.22 CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL MINERAL DE LITIO DE MACUSANI – PUNO**

La determinación de la composición morfológica del mineral de litio es fundamental en los procesos metalúrgicos, ya que influye en la eficiencia de los procesos

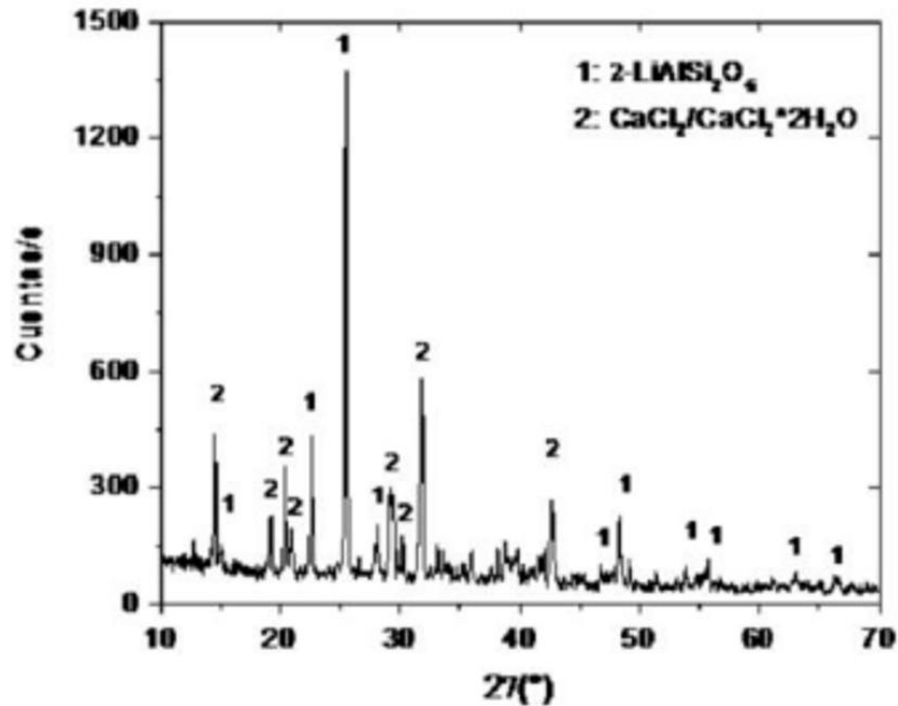




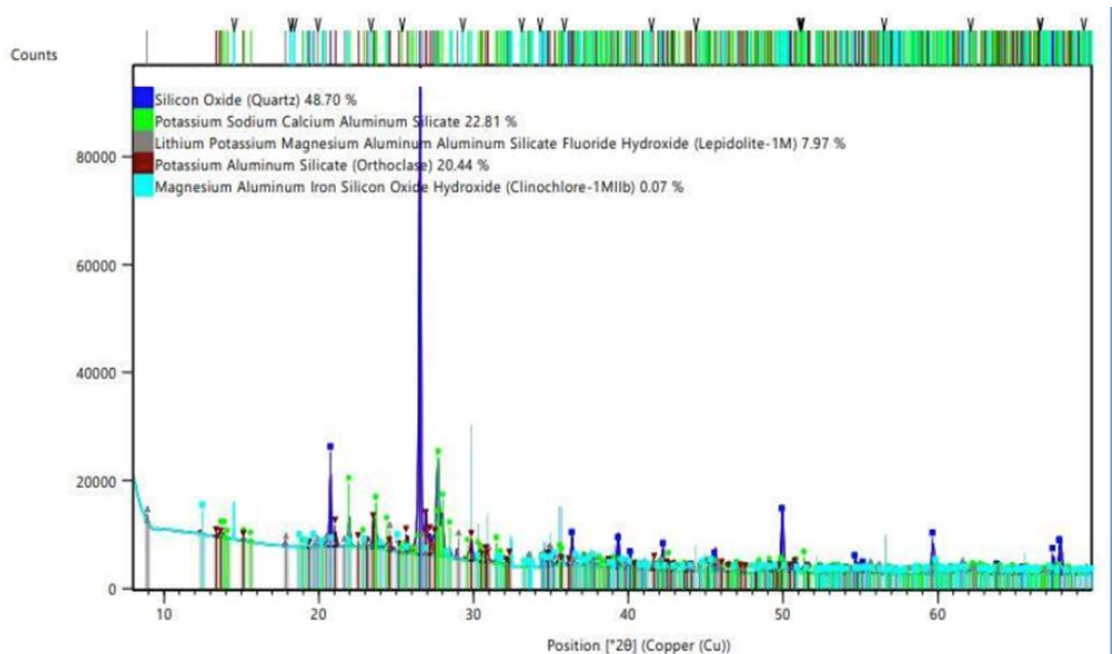
de extracción y refinado del litio. Por ejemplo, el litio se obtiene a partir del mineral espodumeno, un silicato doble de aluminio y litio, y su composición morfológica puede afectar la eficacia de la extracción y refinado mediante cristalización. Asimismo, la mineralogía del litio es crucial para la metalurgia extractiva, ya que influye en los parámetros de proceso, como la dureza del mineral y la cinética de flotación.

### 1.22.1 Análisis de Difracción de Rayos X (DRX)

En este tipo de análisis los resultados salen gráficos tal como se muestra en la **Figura 33**, del estudio realizado “Extracción de litio de  $\beta$ -espodumeno mediante tratamiento térmico con cloruro de calcio” donde son una especie de rayas con picos cada pico representa un compuesto mineralógico, que se está considerando a cada pico como pico 1 donde se le considera a la espodumena  $LiAlSi_2O_6$  y pico 2 al cloruro de calcio  $CaCl_2$  para así poder interpretar su porcentaje de litio que se encuentra en este caso como óxido de litio con un  $Li_2O$  3.9 %,  $Fe_2O_3$  con un 0.3 %,  $K_2O$  con 0.02 %,  $CaO$  con 37.93 %,  $Si_2O$  con 20.63%,  $Al_2O_3$  con 8.3%,  $TiO_2$  con 0.02%,  $MgO$  con 0.08% y otros con 28.1% (Barbosa et al., 2020).



**Figura 33.** Resultado de DRX de una muestra que tiene Espodumena (Fuente: “Extracción de litio de  $\beta$ -espodumeno mediante tratamiento térmico con cloruro de calcio”, Barbosa, et al., 2020)

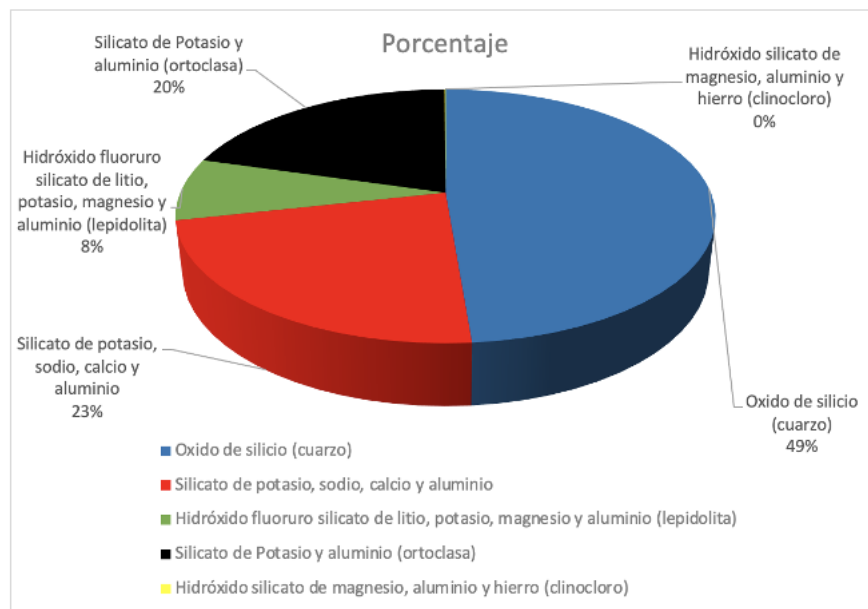


**Figura 34.** Resultados del Difractómetro de rayos X (Fuente: Laboratorio SLab).

Esta técnica permite la caracterización del mineral de litio, permitiéndonos identificar la composición mineralógica, para ello se seleccionó la muestra con

mayor concentración de litio, siendo la muestra 270-P2 en base a los resultados emitidos por el equipo Difractómetro de rayos X, PANALYTICAL, EMPYREAN, que nos dio como resultado el difracto grama de la muestra 270-P2 la cual se puede visualizar en la **Figura 34**.

En base a los resultados obtenidos del difracto grama de la muestra 270-P2 se hace la interpretación, y la construcción de la **Tabla 25** donde podemos visualizar al Oxido de Silicio, Silicato de sodio, calcio, potasio y aluminio entre otros, como por ejemplo su porcentaje en la muestra y en base a estos resultados de la **Tabla 25**, se puede ver la **Figura 35** el porcentaje representando por colores donde se puede llegar a ver en qué porcentaje de cada compuesto mineralógico, de la muestra 270-P2 que es de 210 gramos y con estos resultados ya sabemos en qué compuesto se encuentra el litio para posteriormente hacer las recomendaciones para hacer la concentración más adecuada para este mineral.



**Figura 35.** Resultado de los análisis en porcentaje de composición química (Fuente: Propia).

En el difracto-grama se puede ver las líneas de cada compuesto, y ver en qué cantidad se encuentran en base a los colores de las líneas que se ven los compuestos y que se pueden encontrar.

**Tabla 25.**

*Resultados de análisis de difracción de rayos X en la muestra 270-P2*

Mineral	Color	Formula de Mineral	Resultados %
<b>Oxido de silicio (cuarzo)</b>	Azul	$SiO_2$	48.7
<b>Silicato de potasio, sodio, calcio y aluminio</b>	Verde Limón	$K_{0.11}Na_{0.81}Ca_{0.04}AlSi_3O_8$	22.81
<b>Hidróxido fluoruro silicato de litio, potasio, magnesio y aluminio (lepidolita)</b>	Plomo	$K(Al_{1.13}Li_{1.48}Mg_{0.39})(Al_{0.57}Si_{3.43}O_{10})(F_{1.62}(OH$	7.97
<b>Silicato de Potasio y aluminio (ortoclasa)</b>	Marrón	$KAlSi_3O_8$	20.44
<b>Hidróxido silicato de magnesio, aluminio y hierro (clinocloro)</b>	Celeste	$Mg_{2.8}Fe_{1.75}Al_{2.7}Si_{2.65}O_{10}(OH)$	0.07

**Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos del laboratorio**

En la Figura 35 se puede llegar a mostrar por porcentajes en base a los resultados del difractómetro de rayos X mostrados en la Figura 34 y con la Tabla 25 de cada uno de los compuestos químicos que se vio en la muestra analizada su porcentaje y en forma de que compuestos se encuentran en una cantidad de una muestra de 210 gramos aproximadamente.

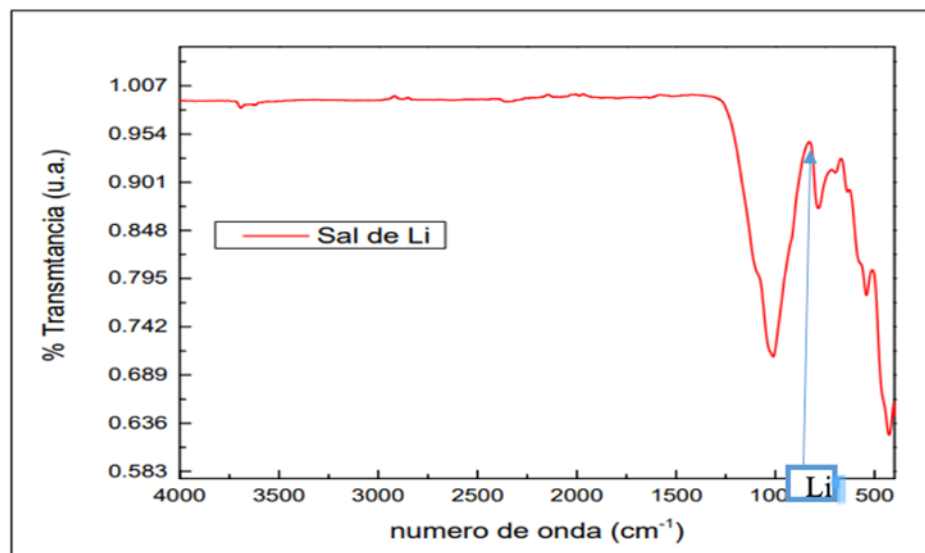
En la muestra 270-P2 se encontró cuarzo con un 48.7 %, Lepidolita con un 7.97 %, la Ortoclasa con un 20.44 %, Clinocloro con un 0.07 %, silicato de potasio, sodio, calcio y aluminio con un 22.81 % y un 0.01% de otros no detectados y considerados.

En base al estudio de “Extracción de litio de  $\beta$ -espodumeno mediante tratamiento térmico con cloruro de calcio” se ve que su porcentaje de espodumena de litio es 3.9% a comparación de la muestra que es la lepidolita con un porcentaje

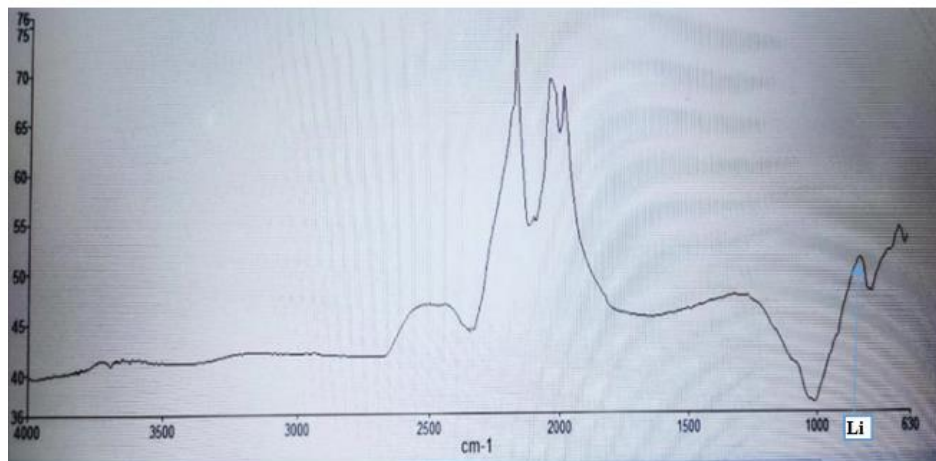
mayor que es de 7.97 % es decir que nuestro porcentaje de Litio es mayor que en el Antecedente y que esta técnica si nos logra detectar el tipo de mineralógico con su concentración (Barbosa et al., 2020).

### 1.22.2 Análisis del mineral de litio por Espectroscopia Infrarroja (FTIR)

El análisis del mineral de litio por Espectroscopia Infrarroja es importante en los procesos metalúrgicos, ya que permite la identificación de los componentes del mineral y su concentración. La Espectroscopia Infrarroja es una técnica no destructiva que se utiliza para analizar la composición química de los minerales, y es especialmente útil para la identificación de minerales de litio, como la espodumena, lepidolita y otros. Además, la Espectroscopia Infrarroja puede ser utilizada para la identificación de impurezas en el mineral de litio, lo que es importante para la calidad del producto final.



**Figura 36.** Resultado de la Transmitancia con numero de onda donde se muestra la sal de litio (Fuente: Laboratorio SLab)



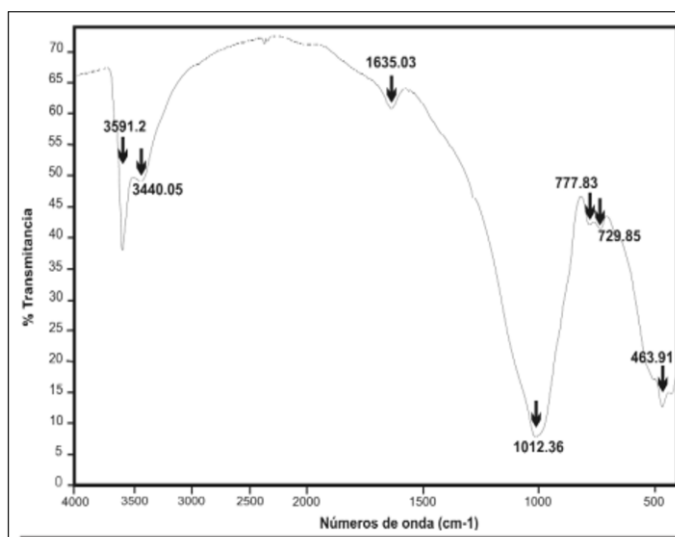
**Figura 37.** Resultado completo de Espectroscopia Infrarroja (Fuente: Laboratorio SLab)

En el análisis de FTIR se tiene dos figuras las cuales son la **Figura 36** y **Figura 37**, nos muestran el mismo resultado solo que en una se ve mejor que en la otra la parte de sal de litio en la **Figura 36** se ve más claramente la sal de litio y en la figura 37 se todo el resultado del análisis FTIR, esto esta expresado de la transmitancia con respecto al número de onda “ $cm^{-1}$ ” o longitud de onda cómo puede apreciar en la **Figura 36** la sal de litio esta  $770cm^{-1}$  de numero de onda o de longitud de onda. Esto no se puede visualizar bien en la **Figura 37** por eso se consideró las dos figuras para posterior mente poder comprar con una tercera **Figura 38** y 39 comprobar que verdaderamente tiene litio en estado en estado de sal la cual se muestra más adelante. ya que en la **Figura 36** se ve exactamente desde donde se pueden encontrar o identificar la sal de litio en la **Figura 37** se muestra el resultado completo por el equipo PERKIN ELMER, FROTIER para el análisis de Espectroscopia Infrarroja.

En los resultados obtenidos en el estudio de “Edad y caracterización de una mica de Litio asociada a un Sistema de Greisen en Mina la Rosario, sierra de Fiambalá, Catamarca” se logra visualizar un gráfico de transmitancia con respecto al número de onda “ $cm^{-1}$ ” donde el litio aparece desde el punto de 777.83

número de onda  $cm^{-1}$ , el cual se puede visualizar en la figura 38 (Avila et al., 2008).

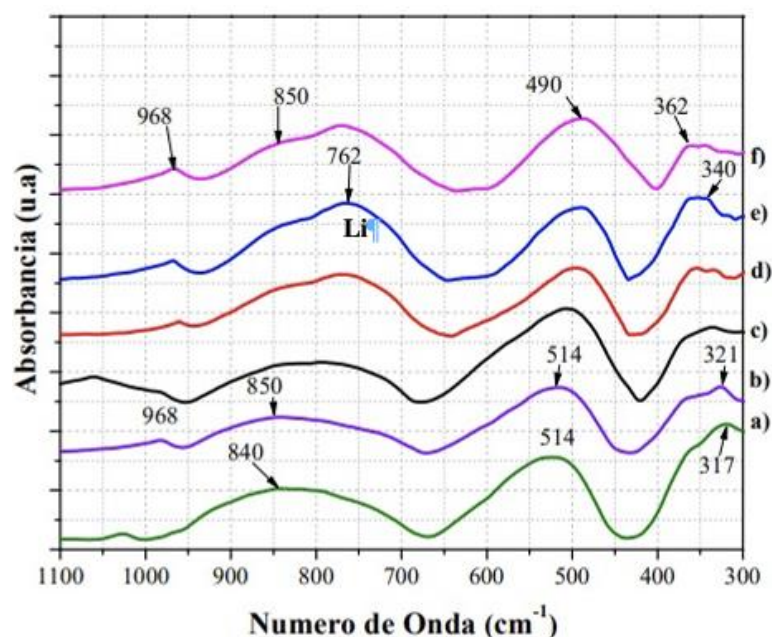
Claramente como se puede visualizar en las **Figura 36**, **Figura 37**, **Figura 38** tienen una gran similitud ya que se encuentran con litio al ver el resultado las tres figuras y están dentro del rango que se detecta el litio que es 777.83 número de onda  $cm^{-1}$  versus la transmitancia si bien es cierto concuerdan con en el número de onda la curva no concuerdan muy bien en la transmitancia y se da conocer que concuerda con los resultados hallados, por tal motivo es que esta prueba si nos detecta Litio, pero no en los mismo puntos de longitud de onda debido a que en los antecedentes se encuentra el litio pero en forma de otro compuesto, pero muy cerca de la longitud de onda  $cm^{-1}$  tanto como de los antecedentes de la figura 38 y 39 y por resultado del laboratorio el litio se encuentra en forma de Lepidolita y en algunas traza de espodumena.



Li

**Figura 38.** Resultado de FTIR del estudio realizado “Edad y caracterización de una mica de Litio asociada a un Sistema de Greisen en Mina la Rosario, sierra de Fiambalá, Catamarca” (Fuente: Avila, J. C., Rubinstein, N., Morello, O., & Fogliata, A. (2008).

Tanto como en la figura 38 y 39 se puede visualizar que el litio se detecta a en el número de onda de  $\text{cm}^{-1}$ , cerca de 750 de longitud de o próximo a ese punto en la figura 38 se encuentra el litio en 777.83 de longitud de onda, mientras que en la figura 39 la longitud de onda en la línea “e” con color azul a 762 de longitud de onda  $\text{cm}^{-1}$  y nosotros encontramos la longitud e onda en 770  $\text{cm}^{-1}$  es decir que nuestra muestra si contiene litio, ya que el resultado no arroja dentro del parámetro de los antecedentes.



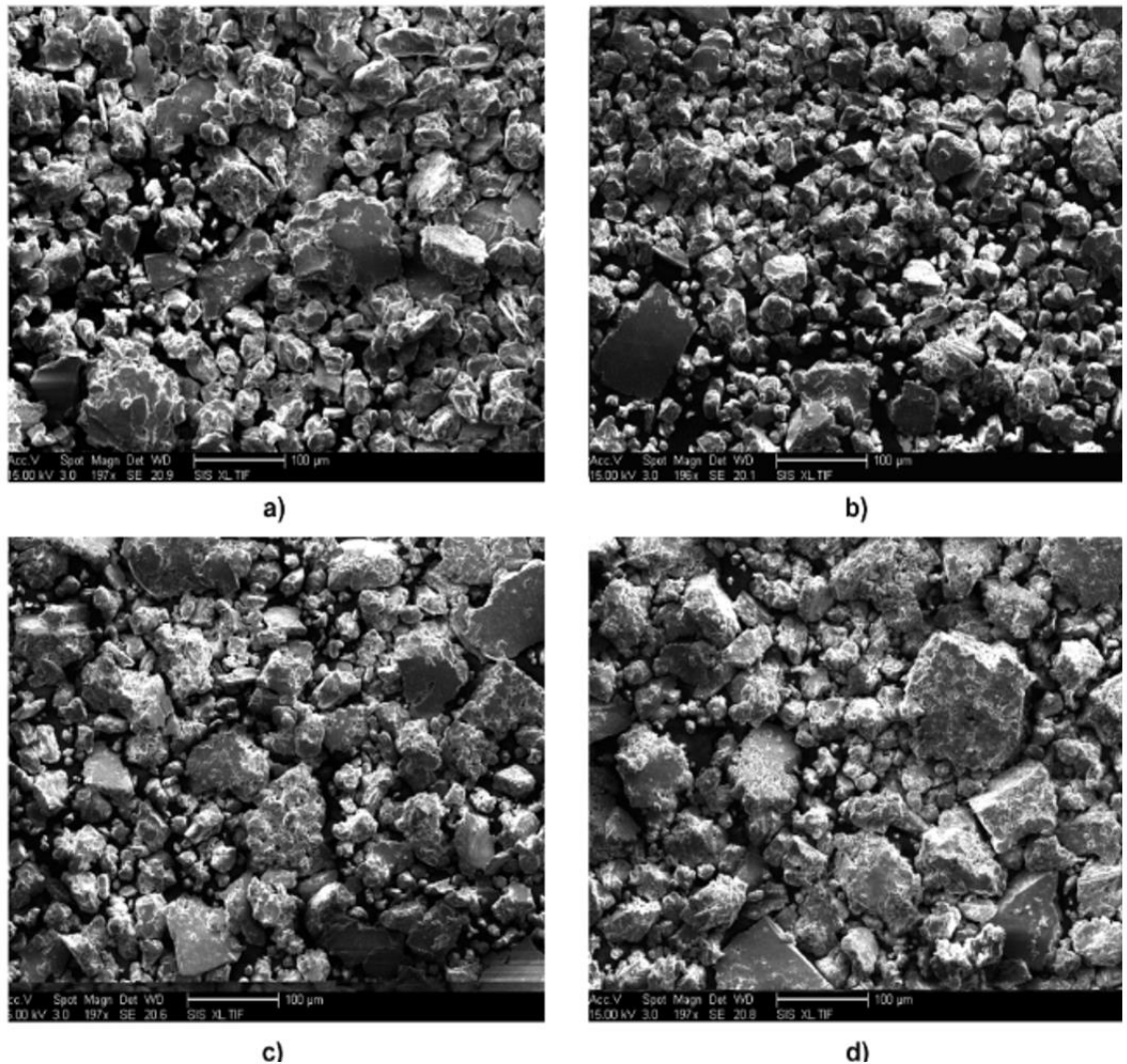
**Figura 39.** Resultados de FTIR del estudio realizado “Efecto del contenido de óxido de Litio en Formulaciones Catalíticas CoMo/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ -MgO-Li $_2$  O(x) para la hidrodesulfurización de dibenzotiofeno” Fuente: Solis D.A., Klimoya T. & Escobar J. (2013).

### 1.22.3 Análisis del mineral por microscopía electrónica de barrido (SEM)

En el estudio de “Influencia de la atmosfera de control y tiempo de molienda sobre la morfología y microestructura de polvos de cobre y cobre-2.5% de litio producidos por aleado mecánico”, nos da como resultado la Figura 40



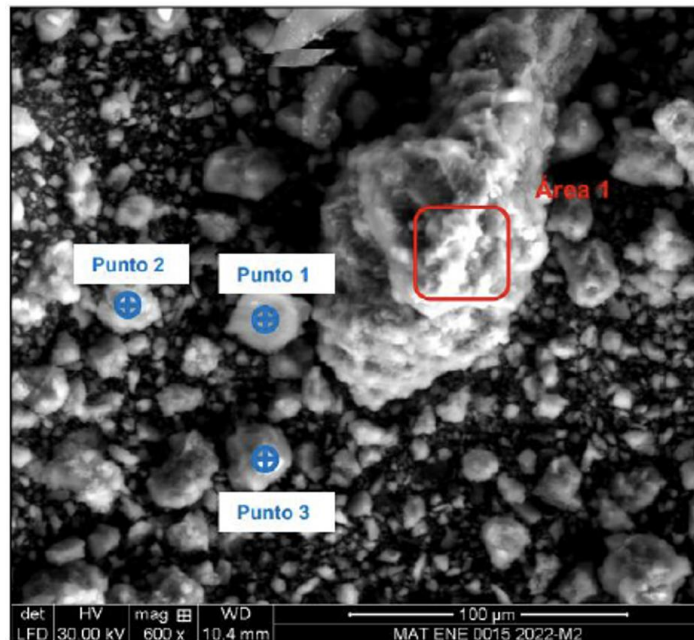
donde se logra ver el resultado SEM de cuatro áreas las cuales son consideradas como área a, b, c y d todas a 100  $\mu\text{m}$  micrómetros (Rojas et al., 2009).



**Figura 40.** Resultado SEM de “Influencia de la atmosfera de control y tiempo de molienda sobre la morfología y microestructura de polvos de cobre y cobre-2.5% de litio producidos por aleado mecánico” (Fuente: Rojas, P. A., Álvarez, M. P., Peñaloza, A., Zúñiga, A.

En los resultados mostrados se puede mostrar dos áreas las cuales son las **Figura 41** y **Figura 42**, en la **Figura 42** esta 50  $\mu\text{m}$  micrómetros, pero en la **Figura 41** está a 100  $\mu\text{m}$  micrómetros y cada figura tiene un área y unos puntos área 1 y el área 2 en donde cerca de cada área se pueden encontrar los puntos que

conforman los cinco puntos las cuales son correspondientes cerca del área 1 y área 2 como se podrán visualizar más adelante.



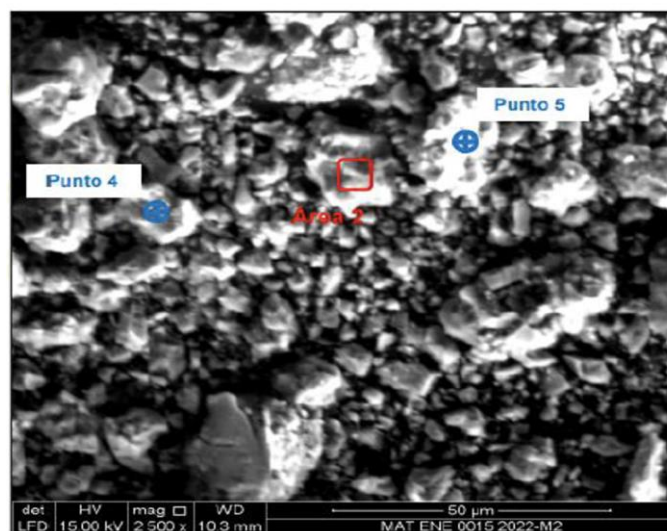
**Figura 41.** Resultado con los puntos de referencias en el área 1 de SEM (Fuente: Laboratorio Slab)

En la **Figura 41** es el resultado donde se puede mostrar el área 1 con los tres primeros puntos los cuales son los punto 1,2,3 en cada uno de los punto se encuentra el mineral de litio como manera de compuesto que es en forma de (lepidolita)  $K(Al_{1.13}Li_{1.48}Mg_{0.39})(Al_{0.57}Si_{3.43}O_{10})(F_{1.62}(OH)_{0.38})$  estos tres puntos dentro del área es donde se encuentra el litio esto es de un muestra representativa de 200 gramos aproximadamente donde se llevó a cabo el estudio del SEM en la muestra de 270-P1.

En la **Figura 41** se muestra el área 2 y con los puntos 4 y 5 tanto como en el área y en los puntos se encuentra el mineral de litio en forma de compuesto que es en forma de (lepidolita)  $K(Al_{1.13}Li_{1.48}Mg_{0.39})(Al_{0.57}Si_{3.43}O_{10})(F_{1.62}(OH)_{0.38})$  este es el resultado de la muestra 270-P1 ya con estos resultados se puede comparar no se puedo encontrar

en más áreas o punto debido a que la concentración de litio en las muestra son baja, y que además este tipo de equipo solo detecta a elementos con número atómico mayores a 11 y en este caso el litio tiene número atómico de 3, y otro motivo por el cual no se detectó litio en otros puntos es porque la muestra ha sido demasiado molida a un punto demasiado fino y por eso no lo detecta ya que el litio posiblemente se encontraría en estado amorfo.

Como se observa en la **Figura 41** con la **Figura 40** son muy parecidos los resultados ya que en ambos hay litio, pero no en grandes concentraciones este tipo de análisis es muy delicado para que el equipo lo logre detectar hay que tener mucho cuidado con las muestras al momento de manipularlas y al momento de reducir de tamaño hasta que llegue a malla N°140 pero no muy finas , en el caso de la **Figura 42** también es parecido a la Figura 41 que también es un estudio de Litio pero no son iguales la imágenes.

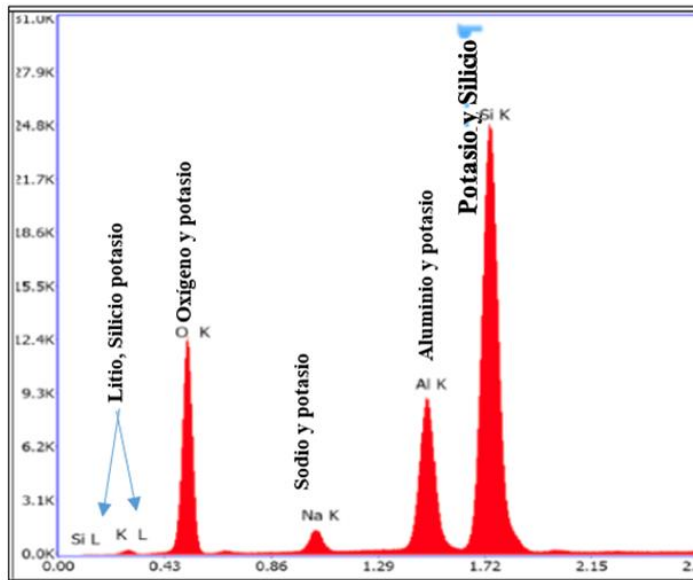


**Figura 42.** Resultado con los puntos de referencia en el área 2 de SEM (Fuente: Laboratorio Slab)

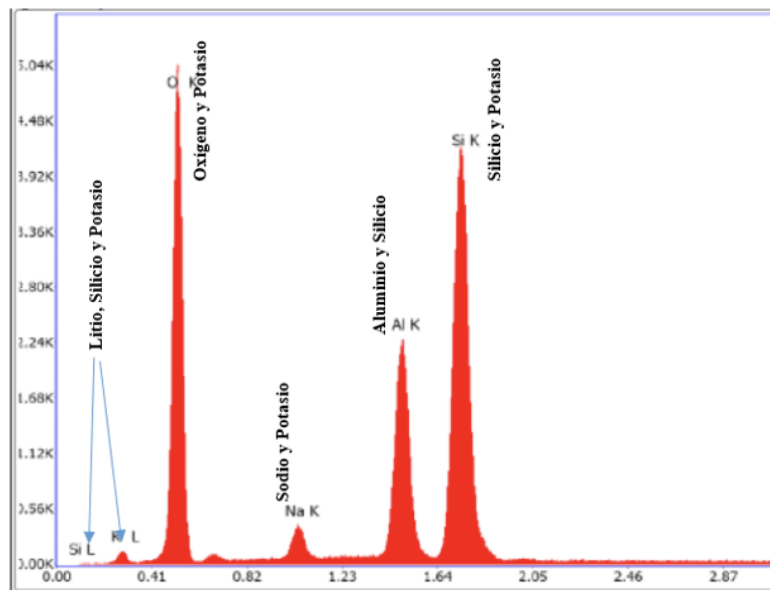
En las Figuras 43 y 44 se van a ver los resultados del SEM en forma de gráficos del área 2 y el área 1, con respecto al resultado donde se puede determinar

que en cada área y los puntos marcados sobremos la composición química del mineral en que cantidades para corroborar a los resultados ya obtenidos.

Dentro de estos gráficos se puede determinar los elementos los cuales son el Aluminio, Litio, Silicio, Sodio, Potasio y Oxígeno.



**Figura 43.** Resultados de SEM de los puntos del Área 1 (Fuente: Laboratorios Slab)



**Figura 44.** Resultados de puntos del área 2 (Fuentes: Laboratorios Slab)



## V. CONCLUSIONES

La cinética de molienda del mineral de litio del distrito de Macusani – Puno se ajusta al modelo cinético de Tovarov V.V.

Las características físicas son las siguientes: Color (Blanco parecido al yeso), color de raya (blanco), dureza promedio (5.5 a 6 en la escala de Mosh), densidad aparente promedio (1.97 gr/ml.).

La concentración de litio en promedio es de 2047.4 ppm, se encontró una pequeña diferencia en las cantidades de litio encontradas en cada muestra, teniendo como cantidad mínima en la muestra 270-P1 un resultado de 1865 ppm de litio y una cantidad máxima en la muestra 270-C de 2188 ppm de litio; se observó una pequeña diferencia entre la cantidad de partículas por millón de cada muestra a pesar de que el peso de cada muestra era similar (con una diferencia en el peso de  $\pm 3$  gr.)

Mediante Difracción de Rayos X (DRX) se determinó la composición mineralógica del material de Litio de la muestra 270-P2 es: Cuarzo (48.7%), Ortoclasa (22.44%), Clinocloro (0.07%), Lepidolita (7.97%), el cual es un mineral que contiene Litio) y otros tipos de silicatos (22.81%).



## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar otros análisis que permitan profundizar las características del mineral de litio, análisis Espectroscopía Raman y análisis por microscopia QEMSCAN que es el acrónimo en inglés de Evaluación Cuantitativa de Materiales mediante Microscopio Electrónico de Barrido.

Por otro lado, la identificación de la composición y caracterización química y física permitirá a posteriores trabajos mejorar la eficiencia en sus procesos, por ello, se recomienda en base a los resultados de esta Tesis, plantear de mejor manera los procesos de lixiviación acida o básica, concentración por flotación ente otros procesos de extracción de litio.

Se deben toman otros puntos de muestreo para poder identificar la existencia de Espodumena, el cual requiere un proceso distinto a la lepidolita identificada en esta Tesis, por las recientes investigaciones y características del mineral de litio de Macusani, existe la probabilidad que ambos minerales coexistan.

La caracterización es fundamental para identificar las diferentes composiciones que se tendrán en el minero, así como, durante los diferentes profesos como lixiviación o flotación, por lo que, se recomienda, poder realizar la investigación de los diferentes cambios de composición mediante Difracción de Rayos X en diferentes tiempos de lixiviación.





## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad Peña, E. (2014). Análisis multielemental simultáneo de minerales níquelíferos cubanos por ICP-OES.
- Anne E. Egger, Ph.D. "Minerales II" Visionlearning Vol. EAS-2 (8), 2005.
- Aguirre Quezada, Juan Pablo (2021). Regulación del litio. Propuestas y comparativa internacional: Instituto Belisario Domínguez
- Álvaro Manuel Jesam Gaete (2017) Plan de negocios para la manufactura de baterías de litio en Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial
- Avila, J. C., Rubinstein, N., Morello, O., & Fogliata, A. (2008). Edad y caracterización de una mica de litio asociada a un sistema de greisen en Mina La Rosario, Sierra de Fiambalá, Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63(1), 43-48.
- Almagro Fernández, B. (2008). *Desarrollo de nebulizadores neumáticos basados en las tecnologías Flow Focusing y Flow Blurring para su uso en técnicas analíticas basadas en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES e ICP-MS)*. Universidad de Alicante.
- Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 3(2), 62-72.
- Brito Samaniego, I., & Rondo Rojas, AE (2017). Influencia de la granulometría del mineral y temperatura de calcinación en el porcentaje de extracción de Au por cianuración por agitación de un mineral carbonoso aurífero proveniente de Pallasca-Ancash".



- Callejas, F. R. (2000). Tablas de Espectroscopía Infrarroja. *Departamento de Física y Química, UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México): Mexico City, Mexico.*
- Chamay Pando, R. (2020). Recuperación metalúrgica de un yacimiento de litio para su comercialización-Puno-2019.
- Carolina Posada Osorio (BEd) (2021) Las propiedades químicas y físicas del litio o elemento 3 2021 <https://www.yubrain.com/ciencia/las-propiedades-quimicas-y-fisicas-del-litio-o-elemento-3/>
- Calcaneo Gloria, (2018). Corporativo Quimica Global S.A. de C.V.
- Díaz Valdiviezo, A., Carpio Ronquillo, M., & Ramírez Carrión, J. F. (). Litio. “El Litio”- Instituto de investigaciones geológicas. Boletín minero #72**2009**, feb. 1993
- Giraldo, A. V. (2016). La era del Litio. *Revista Colombiana de materiales*, (9), 1-14.
- Gómez, F. L. (1978). Litio: Farmacología y uso terapéutico. *rev. med. hondur*, 46.
- González Mancera, G., & Noguez Amaya, M. E. (2006). *Principios de microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X característicos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Larrea, M. T., Rucandio, I., Pomares-Alfonso, M. S., & Fariñas, J. C. (2014). Desarrollo de una metodología para la determinación de elementos de las tierras raras en aleaciones de magnesio mediante espectrometría de ICP-OES.
- Lenntech (2007). Departamento del Interior de EE.UU., Mineral Commodity Summaries.
- Martí Moscoso, J. M. (2019). Estudio comparativo de yacimientos de litio de Chile, Bolivia, Argentina y Perú.
- Manrique, A. (2014). *Explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina).





- Marmolejo Cervantes, M. Á., & Garduño-Rivera, R. (2021). Mining-Energy Public Policy of Lithium in Mexico: Tension between Nationalism and Globalism.
- Moreno Ramón, H., & Ibañez Asensio, S. (2018). La Escala de Mohs: Dureza de los Minerales.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.
- Marabello, D., Benzi, P., Lombardozzi, A., & Strano, M. (2017). X-ray Powder Diffraction for Characterization of Raw Materials in Banknotes. *Journal of forensic sciences*, 62(4), 962-970.
- Mendoza, A. B., & San Miguel, C. E. B. (2011). Rocas y metales de labor en las cultura andinas. *Investigaciones sociales*, 15(27), 475-499.
- MUÑOZ, A. M., & DÍAZ, J. G. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS LADRILLOS CONSTITUTIVOS DEL PUENTE DE ARCO SOBRE EL RÍO CAUCA, EN POPAYÁN, COLOMBIA.
- Martín Ariel Kazimierski (2018) Almacenamiento energético frente al inminente paradigma renovable: el rol de las baterías ion-litio y las perspectivas sudamericanas, *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*.
- Morales Ramirez, C., & Solis Casados, D. A. (2013). EFECTO DEL CONTENIDO DE ÓXIDO DE LITIO EN FORMULACIONES CATALÍTICAS  $\text{CoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-Li}_2\text{O}$  (x) PARA LA HIDRODESULFURIZACIÓN DE DIBENZOTIOFENO.
- Navatta, M. (2013). Caracterización de hidroxapatitas sintéticas nanoestructuradas mediante espectroscopía infrarroja (FTIR) y difracción de rayos X (XRD).



- Ortega, S. S., & López, R. D. (2017). Análisis de posibilidades de suministro eléctrico mediante baterías de litio conectadas a la red. *TFG Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universidad de Zaragoza*.
- Olesik, J. W. (1991). Elemental analysis using icp-oes and icp/ms. *Analytical Chemistry*, 63(1), 12A-21A.
- Orozco, I., Lara, R., Quiroga, V., & Villafañe, G. (2019). Cuantificación de metales pesados en aguas de minas, mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica por plasma inductivamente acoplado (icp-oes) Quantification of heavy metals in mine.
- Pérez-Monserrat, E. M. (2012). Técnicas de caracterización petrológicas (I): Microscopía Óptica de Polarización (MOP) y Difracción de Rayos X (DRX).
- Piga, G., Santos Cubedo, A., Piccinini, M., & Enzo, S. (2012). An X-Ray diffraction (XRD) study to characterize the mineralogy of dinosaur bones from Arcillas de Morella Formation.
- Penagos, J. I. C. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 3(3), 133-146.
- Ribón Lozano Begoña, (2020). Laboratorio de técnicas instrumentales Uva Espectroscopia de Plasma ICP-OES.
- Rojas, P. A., Álvarez, M. P., Peñaloza, A., Zúñiga, A., & Ordoñez, S. (2009). Influencia de la atmósfera de control y tiempo de molienda sobre la morfología y microestructura de polvos de cobre puro y cobre-2, 5% litio producidos por aleado mecánico. *Revista de Metalurgia*, 45(3), 165-173.
- Rojano Molina, M. (2020). *Síntesis y caracterización de adsorbentes minerales de Fe, Mn y Al para la remoción de selenio en el agua de relave* (Master's thesis).



- Rosas Mendoza, M. E., & Fernandez Muñoz, J. L. (2013). Estudio de los cambios provocados por la Deshidratación Osmótica mediante FTIR.
- Saavedra Diana, (2019). Litio, elemento clave para las nuevas tecnologías, <https://www.gaceta.unam.mx/>
- Suárez, Ó. L., Martínez, M. P. P., & Cortizas, A. M. (2011). Aplicación de la Microscopía Electrónica de Barrido al estudio de los acabados de cerámica antigua de Galicia. *Gallaecia: revista de arqueología e antigüidade*, (30), 117-125.
- Tondo, L. (2009). La aventura del litio. *Trastornos del Animo*, 5, 74-79.
- Tyler, G., & Jobin Yvon, S. (1995). ICP-OES, ICP-MS and AAS Techniques Compared. *ICP Optical Emission Spectroscopy Technical Note*, 5.
- Tuesta, E. G., Vásquez, Y. H., & Ingenieros-BISA, B. (2013). Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera. *Tecnología Minera*, 41, 210-214.
- Vásquez Cordano, Arturo (2018). El Mercado del Litio y la Revolución de las Energías Renovables. Documento de Trabajo N° 002-2018-DI. Dirección de Investigación – Escuela de Postgrado GĔRENS, Perú.
- Zapana Yanarico, R. (2020). Extracción de litio por diferentes métodos de lixiviación en tobas volcánicas del depósito Falchani de Macusani–región Puno, 2018.



## ANEXOS

### Anexo 1: Informe de los análisis químicos por ICP-OES de litio en 5 muestras.



Laboratorios Analíticos del Sur

### Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú  
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294  
+51 (054) 444582  
+51 958 961 254  
+51 958 961 253

#### INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-21-05804

Fecha de emisión: 11/08/2023

Página 1 de 1  
Clave generada : C765934A

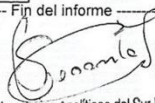
Señores: PINTO MAMANI BRANDON DYLAN  
Dirección: JR. BENIGNO BALLON 851 CERCADO JULIACA, SAN ROMAN. PUNO  
Atención: PINTO MAMANI BRANDON DYLAN  
Recepción: 8/08/2023  
Realización: 8/08/2023  
Observación: El laboratorio no realiza la toma de muestra

#### Métodos ensayados

\*2102 Método de ensayo para Litio por digestión multi ácida - ICP-OES

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*2102
				Li ppm
MN21011939	270-A	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	2 095
MN21011940	270-B	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	2 108
MN21011941	270-C	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	2 188
MN21011942	270-P1	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	1 865
MN21011943	270-P2	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	1 981

Fin del informe

  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Sixto Vicente Juárez Neira  
Gerente General  
Ing. Químico C.I.R. 19474

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com> Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe  
vía web



Anexo 2: Informe de los análisis multi elemental por métodos de ICP-OES de la muestra representativa.



Laboratorios Analíticos del Sur

**Laboratorios Analíticos del Sur**

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú  
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294  
+51 (054) 444582  
+51 958 961 254  
+51 958 961 253

**INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-21-06077**

Fecha de emisión: 19/08/2023

Página 1 de 1  
Clave generada : DBBAA61

Señores: PINTO MAMANI BRANDON DYLAN  
Dirección: JR. BENIGNO BALLON 851 CERCADO JULIACA, SAN ROMAN. PUNO  
Atención: PINTO MAMANI BRANDON DYLAN  
Recepción: 8/08/2023  
Realización: 8/08/2023  
Observación: El laboratorio no realiza la toma de muestra

**Métodos ensayados**

- \*563 Método de ensayo para Arsénico por ICP-OES
- \*586 Método de ensayo para Uranio fusión alcalina ICP-OES
- \*598 Método de ensayo multi-elemental por ICP-OES digestión multi-ácida
- \*628 Método de ensayo para Mercurio por ICP-OES

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*598											
				*563		*586									
				As	U	Ag	Al	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm			
MN21011941	270-C	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	12,92	0,046	10,37	>10000	<4,1	22,2	25,68	<0,5	668,3	0,934	0,54	36,76

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*598										
				Cu	Fe	Ga	In	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P
				ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MN21011941	270-C	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	804,7	2977	<0,41	<0,10	>10000	735,1	484,6	0,61	6566	38,23	908,97

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*598											*628
				Pb	Sb	Se	Sn	Sr	Te	Ti	Tl	V	Zn	Hg	
				ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
MN21011941	270-C	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	499,59	3,36	<0,16	<4	47,83	<0,21	180,29	4,83	312,25	2201	4,00	

Fin del informe  
  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
Sixto Vicente Juárez Neira  
Gerente General  
Ing. Químico C.I.P. 19474

"<Valor numérico">=Limite de detección del método, ">Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.





*Anexo 3: Informe de los análisis FTIR y difracción de Rayos X realizados en el Laboratorio Slab.*

## INFORME DE ENSAYO IE-051021-02

### 1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : BRANDON DYLAN PINTO MAMANI  
1.2 RUC/DNI : 70079280  
1.3 Proyecto : CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA QUÍMICA, COMPOSICIÓN MINERALÓGICA Y MORFOLÓGICA DEL MINERAL DE LITIO DE LA UNIDAD MINERA FALCHANI - MACUSANI - YELLOWCAKE

### 2. FECHAS

2.1 Inicio de Ensayos : 11 de Octubre de 2021  
2.2 Fin de Ensayos : 14 de Octubre de 2021  
2.3 Emisión de informe : 18 de Octubre de 2021

### 3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

3.1 Temperatura : 20.1 °C  
3.2 Humedad Relativa : 52 %

### 4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

4.1 Ensayo solicitado y método de ensayo : Determinación de Composición Química / Difracción de Rayos X  
Caracterización por Infrarrojo / Espectroscopía FTIR ATR

### 5. DATOS DE LAS MUESTRA ANALIZADAS

#### 5.1 Muestra S-2581

Código de Muestra : S-2581  
Tipo de Muestra : Muestra de Mineral  
Descripción : Nro. 270-P2 / Fecha: 21-09-21  
Cód.: MN21011943-cm-1  
Estado : Sólido

Equipo Usado: DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X. PANALYTICAL, EMPYREAN

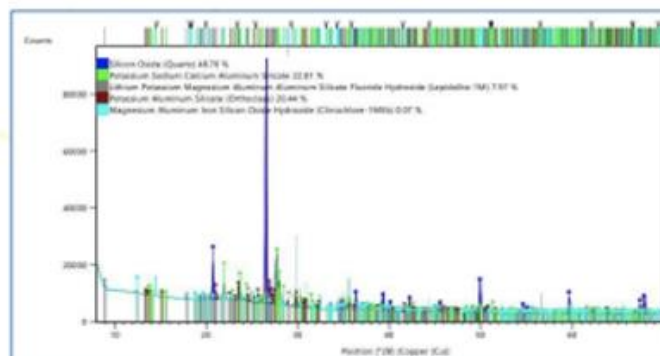


Figura N°1: Difractograma obtenido de muestra S-2581

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

RESERVA SERVICIOS QUÍMICOS  
COP. 1337

## 6.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

Equipo Usado: Espectrofotómetro Infrarrojo. PERKIN ELMER, FRONTIER



Figura N°2: Espectro obtenido de la muestra S-2581

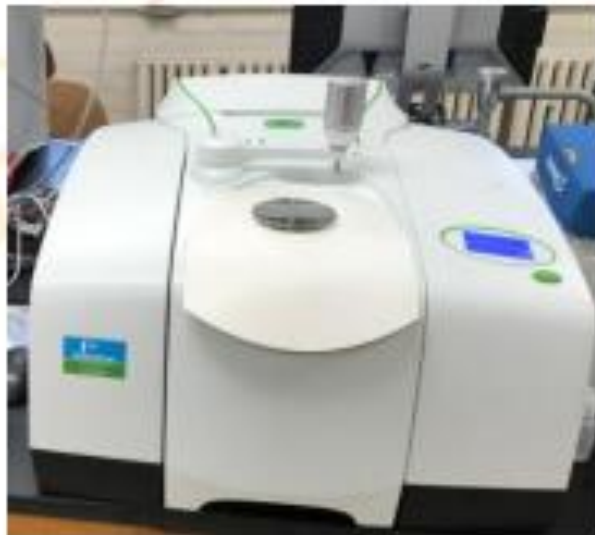


Imagen N°3: Espectrofotómetro Infrarrojo

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

FIN DE DOCUMENTO

DIEGO ROBERTO KIRSARI ORELLANA  
Químico  
ODP. 1337

Anexo 4: Informe de análisis granulométrico y SEM.



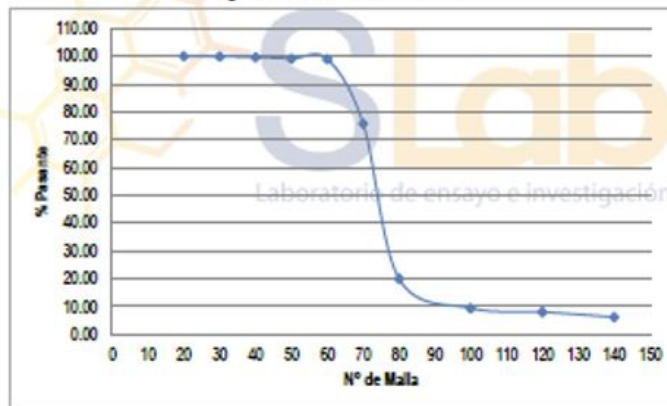
SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS  
QUÍMICOS S.A.C. SLAB

INFORME DE ENSAYO  
IE-110122-05-02

1. DATOS DEL CLIENTE
    - 1.1 Cliente : BRANDON DYLAN PINTO MAMANI
    - 1.2 RUODNI : 70079280
  2. FECHAS
    - 2.1 Inicio : 11 de enero de 2022
    - 2.2 Fin : 31 de enero de 2022
    - 2.3 Emisión de informe : 03 de febrero de 2022
  3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO
    - 3.1 Temperatura : 20.1 °C
    - 3.2 Humedad Relativa : 54 %
  4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA
    - 4.1 Ensayo solicitado y método de ensayo : Granulometría / Tamizado  
Caracterización SEM / Microscopía Electrónica de Barrido.  
Composición Química (Elemental) / Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS)
  5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA
    - 5.1 Datos de la muestra
      - Código de Muestra : S-3046
      - Tipo de Muestra : Muestra Mineral
      - Descripción : Muestra Mineral
      - Estado : Sólido
      - Presentación : Pulverizado
      - Muestreo : Muestreado por el Cliente
- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio  
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.

DIEGO ROMERO VERGARA  
QUÍMICO  
OQP. 1337

Figura N°1: CURVA GRANULOMÉTRICA



- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio  
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.



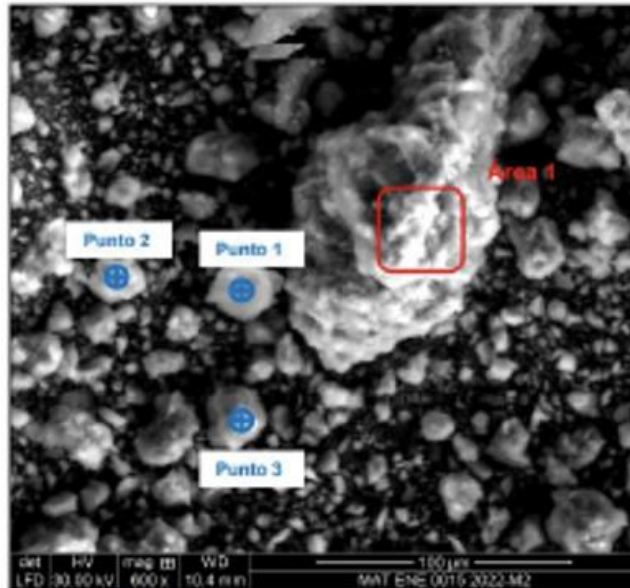
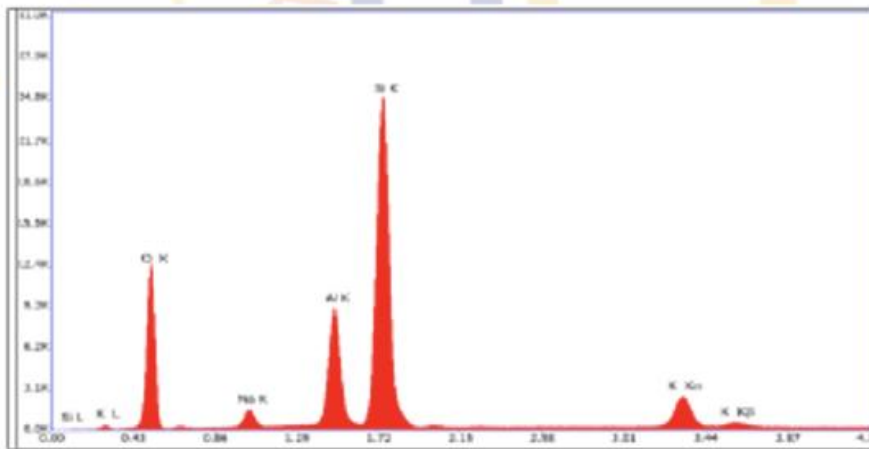


Foto 1: Zona de análisis, 600X.



Gráfica 1: Espectro obtenido del análisis en el Área 1.

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este Informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

DIEGO RODRIGO BERGAMINI D'ARREDO  
QUÍMICO  
CQP. 1337

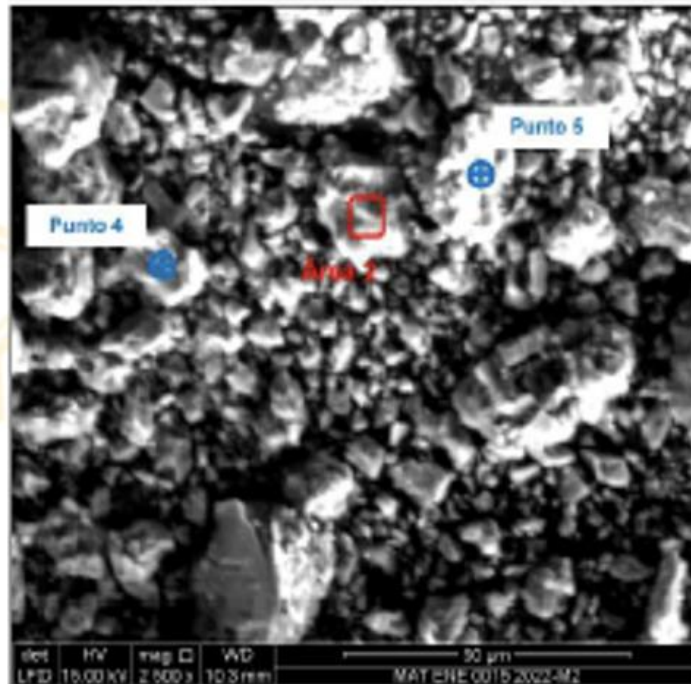
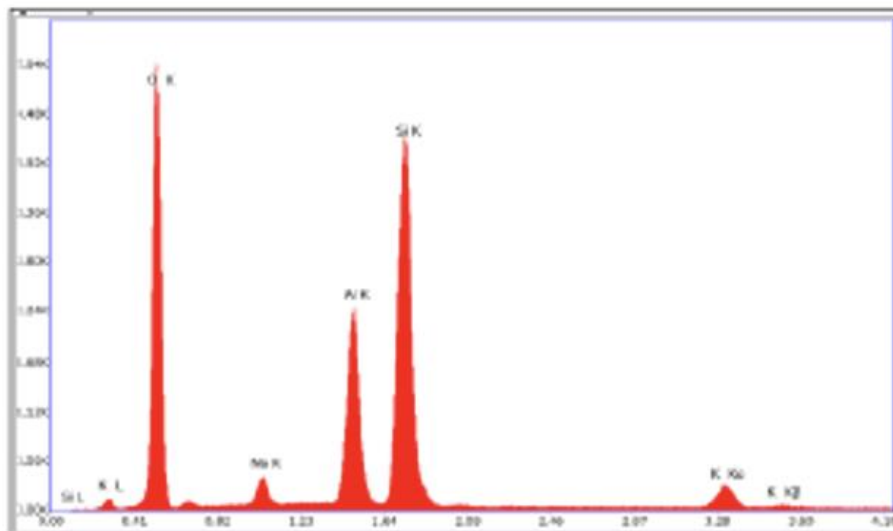


Foto 2: Zona de análisis, 2500X.



Gráfica 5: Espectro obtenido del análisis en el área 2



Anexo 5: Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional.



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

**AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Por el presente documento, Yo Brandon Dylan Pinto Mamani,  
identificado con DNI 70079280 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química,  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Estudio Cinético de la Molienda y Caracterización de la Composición Mineralogía y Química del Mineral de Litio de Macusani - Puno"

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 26 de enero del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella





Anexo 6: Declaración jurada de autenticidad de tesis.



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS**

Por el presente documento, Yo Brandon Dylan Pinto Mamani,  
identificado con DNI 70079280 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Estudio Cinético de la Molienda y Caracterización de la Composición Mineralogía y Química del Mineral de Litio de Macosani - Puno"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 26 de enero del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella