



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



OBTENCIÓN DE CONCENTRADO DE ÓXIDO DE LITIO (Li_2O) POR FLOTACIÓN DE TOBAS VOLCÁNICAS MACUSANI – PUNO

TESIS

PRESENTADA POR:

JUDITH GUTIÉRREZ PACCO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

OBTENCIÓN DE CONCENTRADO DE ÓXIDO DE LITIO (Li₂O) POR FLOTACIÓN DE TOBAS VOLCÁNICAS MACUSANI – PUNO

AUTOR

JUDITH GUTIÉRREZ PACCO

RECuento de palabras

17525 Words

RECuento de caracteres

92393 Characters

RECuento de páginas

113 Pages

Tamaño del archivo

9.9MB

Fecha de entrega

May 23, 2024 7:58 PM GMT-5

Fecha del informe

May 23, 2024 7:59 PM GMT-5

● 13% de similitud general

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

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 4% 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)



Firmado digitalmente por QUILLE
CALIZAYA German FAU
20145496170 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.05.2024 20:02:11 -05:00



Firmado digitalmente por QUILLE
CALIZAYA German FAU
20145496170 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.05.2024 20:03:03 -05:00

Resumen



DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a dios, por permitir seguir con salud para crecer profesionalmente. Así mismo, dedico a mis padres, hermanas y hermano, quienes son principal fuente de inspiración de mi vida. Por su amor, orientación y apoyo incondicional han sido el motor que me impulsa a alcanzar mis metas.

Judith Gutiérrez Pacco



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a dios por ser mi guía y fuente de fortaleza. También expreso mi profundo agradecimiento a mis padres, hermanas, hermano, amigas y amigos que me dieron esos ánimos en los momentos difíciles.

Agradezco a mis maestras y maestros de los niveles, primario y secundario, así como a mis docentes universitarios, por compartirme sus conocimientos y sabiduría. También agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano por las valiosas enseñanzas proporcionadas, en especial a la facultad de Ingeniería Química y escuela profesional de Ingeniería Química, por su compromiso con la formación académica.

Agradezco a mi director/asesor de tesis al Dr. German Quille Calizaya, que permitió asesorarme, para llevar a cabo este proyecto de investigación de tesis. Por su guía experta y apoyo constante han sido fundamentales para alcanzar estos resultados. Así mismo, agradezco a mis jurados por realizar sus valiosas observaciones.

Así mismo, agradezco al laboratorio Bizalab por realizar la caracterización del mineral, contribuyendo significativamente al desarrollo de este trabajo. Mi gratitud también se extiende al Mega laboratorio de Hidrogeoquímica donde encontré el equipamiento necesario y un espacio propicio para llevar a cabo mi proyecto de tesis.

Agradezco al laboratorio de Metalurgia, por brindarme el equipo de flotación, para desarrollar mis pruebas de flotación.

Cada uno de ustedes ha sido una pieza fundamental en este viaje académico y les estoy agradecida por su colaboración, apoyo y contribuciones que han enriquecido significativamente mi experiencia académica.

Judith Gutiérrez Pacco



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. OBJETIVOS.....	17
1.1.1. Objetivo general	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
2.2. MARCO TEÓRICO	23
2.2.1. Litio	23
2.2.2. Uso del Litio.....	24
2.2.3. Mineralogía de minerales con presencia de litio.....	25
2.2.4. Mineralogía de tobas	28
2.2.5. Minerales de ganga	30



2.2.6. Flotación.....	30
2.2.7. Consideraciones y el proceso en la flotación	30
2.2.8. Química superficial de minerales de silicato.	32
2.2.9. Colectores.....	32
2.2.10. Espumantes	36
2.2.11. Reguladores	38
2.2.12. pH.....	40
2.2.13. Componentes de la constante de velocidad.....	40
2.2.14. El papel del tamaño de las partículas y liberación	40
2.2.15. Deslamado.....	43
2.2.16. Variables controladas en el proceso de flotación	44
2.2.17. Pruebas de flotación por lotes	45

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN	48
3.1.1. Ubicación geográfica del estudio	48
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.....	48
3.2.1. Materiales	48
3.2.2. Materiales de vidrio.....	49
3.2.3. Equipos.....	49
3.2.4. Reactivos de flotación	50
3.2.5. Equipos de protección personal (EPP).....	50
3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	51
3.3.1. Preparación mecánica.....	51
3.3.2. Análisis de ley y su composición mineralógica de tobas volcánicas	60



3.3.3. Determinacion de los parametros optimos de flotacion (pH de la pulpa, dosificacion del colector y tiempo de flotacion)	61
3.3.4. Pruebas de flotación	62
3.3.5. Análisis estadístico	65
3.3.6. Diseño factorial 2^k	65
3.3.7. Variables	68

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANALIZAR LA LEY Y SU COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE TOBAS VOLCÁNICAS	69
4.1.1. Análisis de ley	69
4.1.2. Composición mineralógica.....	70
4.1.3. Composición química de la muestra	73
4.2. DETERMINAR LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE FLOTACIÓN (pH DE LA PULPA, DOSIFICACIÓN DEL COLECTOR Y TIEMPO DE FLOTACIÓN	76
4.2.1. Modelo de regresión de las 12 pruebas experimentales	76
4.2.2. Análisis de varianza para la recuperación	79
4.2.3. Coeficiente de regresión para el porcentaje de recuperación	82
4.2.4. Optimización del proceso de flotación.....	83
4.2.5. Diagrama de Pareto	85
4.2.6. Efectos principales de los factores	86
4.2.7. Superficie de respuesta.....	87
V. CONCLUSIONES.....	89
VI. RECOMENDACIONES	90



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	99

AREA: Ingeniería de Procesos

TEMA: Obtención de concentrado de óxido de litio (Li_2O) por flotación de tobas volcánicas Macusani – Puno.

FECHA DE SUSTENTACION: 30 de mayo del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Propiedades químicas y físicas del litio	24
Tabla 2 Minerales que contienen litio	26
Tabla 3 Colectores para minerales de silicatos y óxidos	34
Tabla 4 Tamizado de mineral en 5 fracciones	42
Tabla 5 Distribución del tamaño de partículas y contenido de rubidio y litio	43
Tabla 6 Características de la chancadora de mandíbulas	53
Tabla 7 Características del molino de bolas.....	54
Tabla 8 Distribución de las bolas	56
Tabla 9 Variable de control.....	66
Tabla 10 Diseño experimental de 2^3 , con 4 replicas centrales.....	67
Tabla 11 Ley del mineral de cabeza.....	69
Tabla 12 Composición mineralógica del mineral de tobas volcánicas.	71
Tabla 13 Análisis químico semicuantitativo de la muestra (fracción en masa, %). ...	73
Tabla 14 Diseño experimental de las pruebas de flotación y resultados obtenidos....	77
Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA).....	80
Tabla 16 Coeficiente de regresión para porcentaje de óxido de litio.....	82
Tabla 17 Valores óptimos de variables independientes	84



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Productos finales de litio a nivel mundial	25
Figura 2 Ubicación de la concesión Falchani – Macusani – Puno	29
Figura 3 Principio de la flotación.....	31
Figura 4 Las variables interrelacionados a la flotación	32
Figura 5 Recuperación por flotación de moscovita y cuarzo con DDA, NaOl y mezcla NaOl/DDA en función del pH (a) y la concentración (b)	36
Figura 6 Estructura general de la molécula del espumante.....	37
Figura 7 Estructura del espumante MIBC.	38
Figura 8 Tendencia de recuperación típica en función del tamaño de partícula y el tiempo	41
Figura 9 Pruebas de flotación por lotes usando una celda Denver	46
Figura 10 Reducción del mineral manualmente	51
Figura 11 Trituradora de mandíbulas.....	53
Figura 12 Molino de bolas	54
Figura 13 Altura de Hc de la carga	55
Figura 14 Diagrama de flujo de la preparación mecánica del mineral	59
Figura 15 Estructura de la dodecilmina	62
Figura 16 Diagrama de flujo de balance de masa	65
Figura 17 Diagrama de Pareto de los valores estandarizados de los tres factores para la recuperación de litio	86
Figura 18 Efectos principales de los parámetros	87
Figura 19 Superficie de respuesta	88



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Tamizaje del mineral fino utilizando ROTAP.....	99
ANEXO 2 Equipo de flotación.....	100
ANEXO 3 Ajuste del pH de la pulpa	101
ANEXO 4 Adición del colector con la ayuda de una micropipeta por una cantidad de 358mL.....	102
ANEXO 5 Retiro de concentrados	103
ANEXO 6 Secado de las muestras en la estufa	104
ANEXO 7 Reactivos de flotación	105
ANEXO 8 Análisis de laboratorios de analíticos del Sur.....	106
ANEXO 9 Análisis de laboratorios de fluorescencia de rayos X.....	107
ANEXO 10 Análisis de laboratorio por difracción de rayos X.....	108
ANEXO 11 Espectro de difracción de rayos X.....	109
ANEXO 12 Análisis de concentrados	110
ANEXO 13 Ubicación de la coordenada de muestreo	111
ANEXO 13 Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional	112
ANEXO 13 Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	113



ACRÓNIMOS

XRD:	Difracción de Rayos X
XRF:	Fluorescencia de Rayos X
ICP – OES:	Plasma de Acoplamiento Inductivo – Espectrofotómetro de Emisión Óptico
Li ₂ O:	Oxido de litio
pH:	Potencial de hidrogeniones
mL:	Mililitros
%:	Porcentaje
µm:	Micro metros
USGS:	Servicio geológico de los estados unidos
t:	Tiempo de flotación
IEP:	Punto isoelectrico o punto de carga cero
DA o DDA:	Dodecylamina
M:	Molar
MIBC:	Metil isobutil carbinol
PPG:	Polipropilenglicol
NaOl:	Oleato de sodio
b.c.c.	Cubica centrada en cuerpo
FTIR:	Espectroscopia infrarroja con transformada de fourie
P80:	Tamaño de tamiz que deja pasar 80% de las partículas del producto.
Ev:	Electrovoltios
V:	Voltage
°C:	Grado Celsius



KJ/mol:	Kilo joule/mol
Å :	Angstrom
XPS:	Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X
CMC:	Carboximetilcelulosa
IUREP:	International Uranium Resources Evaluation Project Mission
Rb:	Rubidio
Al:	Aluminio
K:	Potacio
Fe:	Hierro
Ca:	Calcio
U:	Uranio



RESUMEN

El litio, un elemento moderadamente abundante, se encuentra en diversas formas en la corteza terrestre, como minerales de espodumeno, petalita, lepidolita y Zinnwaldita, así como en salares, agua de mar y en formas secundarias a partir del reciclaje de baterías. Este estudio tiene como objetivo obtener concentrado de óxido de litio a partir de tobas volcánicas de la region de Macusani – Puno. Las muestras se obtuvieron del yacimiento Falchani y se sometieron a operaciones de conminución utilizando equipos de chancado y molino de bolas, reduciendo el mineral a una granulometria de 105 μm en 28 minutos de molienda. Posteriormente, se llevo a cabo la flotacion en una celda experimental, variando los parametros (pH, concentracion del colector y tiempo de flotacion) mediante un diseño estadístico factorial de 2^3 , con 12 ensayos, incluidos 4 repeticiones en los puntos centrales. los resultados muestran la presencia del litio en inclusiones en minerales aluminosilicatos y silicatos de potasio, lo que dificulta su extraccion directa. Para superar este desafio, se empleo la tecnica de flotacion por espuma, demòstrando ser efectiva para separar la ganga del litio. Se óptimizaron las variables del proceso de flotación a pH 10, concentración de dodecilamina 35×10^{-6} M y tiempo de flotación de 9 minutos. Se concluye que el mineral de Macusani se logro concentrar con un contenido de oxido de litio del 2.22% y una recuperacion del 67.96%.

Palabras claves: Flotación, oxido de litio, dodecilamina, toba volcánica.



ABSTRACT

Lithium, a moderately abundant element, is found in various forms in the Earth's crust, such as spodumene minerals, petalite, lepidolite, and Zinnwaldite, as well as in salt flats, seawater, and in secondary forms from battery recycling. This research aims to obtain lithium oxide concentrate from volcanic tuffs in Macusani – Puno region. The samples were obtained from “Falchani” deposit and were subjected to comminution operations using crushing and ball mill equipment, reducing the mineral to a granulometry of 105 μm in 28 minutes of grinding. Subsequently, flotation was carried out in an experimental cell, varying the parameters (pH, collector concentration and flotation time) using a 2^3 factorial statistical design, with 12 trials, including 4 repetitions at the central points. The results show the presence of lithium in inclusions in aluminosilicate minerals and potassium silicates, which makes its direct extraction difficult. To overcome this challenge, the foam flotation technique was used, proving to be effective in separating gangue from lithium. The flotation process variables were optimized at pH 10, dodecylamine concentration 35×10^{-6} M and flotation time of 9 minutes. It is concluded that the Macusani mineral was concentrated with a lithium oxide content of 2.22% and a recovery of 67.96%.

Keywords: Flotation, lithium oxide, dodecylamine, volcanic tuff.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El litio (Li) es un elementos esencial para la producción y almacenamiento de energía en las baterías de iones de litio, ha ganado una gran demanda debido al rápido aumento de la demanda de tecnologías verdes de almacenamiento de energía y la demanda futura seguirá aumentando según la Agencia Internacional de Energía (AIE), la demanda mundial de litio en 2040 será más de 40 veces mayor que la de 2020 (Wang He et al., 2023).

El litio se encuentra principalmente en rocas ígneas (Chisha, 1983). Las rocas enriquecidas en minerales de silicatos de litio y/o fosfatos son las principales fuentes de litio (Kesler et al., 2012). La flotación por espuma, desarrollada en el XIX, es un proceso fundamental en la industria minera para la separación selectiva de minerales valiosos de ganga (Taggart, 1945). Este método se basa en la capacidad de ciertos minerales de adherirse a las burbujas de aire y elevarse a la superficie de una suspensión acuosa, formando una espuma que pueda ser recolectada como concentrado (Fuerstenau et al., 2007). Es un proceso ampliamente utilizado en la industria minera para la separación selectiva de los minerales de silicatos en la flotación por espuma (Yue & Jial, 2014). Señalaron (Pugh et al., 1995) la flotación de minerales de cuarzo, silicatos, mica y minerales óxidos se usa frecuentemente colectores aminas. Los colectores aminas sobre la superficie del mineral conduce a una estructura hidrofobicas en rangos de pH ácido y alcalino (Gaudin & fuerstenau., 1955).

En este trabajo de investigación, se enfoca en la aplicación de la flotación por espuma para la concentración de óxido de litio, con el objetivo de optimizar los parámetros de



operación, así mismo, se verá el comportamiento de adsorción de la dodecilamina (DA) y sus mezclas en diferentes proporciones molares y dosis; el ajuste del pH, tiempo de condicionamiento y la velocidad del agitador, entre otros, con el fin de obtener concentrados de alta pureza. Además, se investigaran las características químicas de los minerales presentes en la muestra de estudio, así como su comportamiento durante el proceso de flotación. Las cuales tuvieron los siguientes objetivos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Obtener concentrado de óxido de litio (Li_2O) por flotación de tobas volcánicas Macusani - Puno.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar la ley y su composición mineralógica de tobas volcánicas.
- Determinar los parámetros óptimos de flotación (pH de la pulpa, dosificación del colector y tiempo de flotación).



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Quille (2022) llevaron a cabo una investigación centrada en la obtención de carbonato de litio mediante un proceso de lixiviación, concentración, evaporación y precipitación. El estudio incluyó la reducción del tamaño del mineral a través de una malla pasante de $-74 \mu\text{m}$, con un porcentaje de malla pasante del 87% en una muestra de 10 kg. Además, se realizó una exhaustiva caracterización del mineral mediante activación neurótica, que identificó la presencia de 25 elementos, incluido el uranio con una concentración de 7.1 ± 1.4 ppm. Los análisis también revelaron los valores de impurezas, como Al ($8.80 \pm 0.82\%$), As (79.0 ± 7.4 mg/kg), Cs (258 ± 24 mg/kg), Na ($1.26 \pm 0.12\%$), K ($3.12 \pm 0.35\%$), Mg ($0.14 \pm 0.02\%$), W (85 ± 8 mg/kg), Zn (113 ± 11 mg/kg), entre otros. Mediante espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), se determinó una ley del mineral de 3625 ppm de Li, equivalente al 0.77% de Li_2O , junto con la presencia de otros elementos como Ba, Cd, Cu, S, Pb, Mo, Bi y Ag. Los resultados de la espectroscopia de adsorción atómica (AAS) mostraron una ley similar del mineral de litio (3598 ± 10 ppm de Li). Además, los análisis de fluorescencia de rayos X con energía dispersiva (DFX) indicaron una concentración de dióxido de silicio del $65.69 \pm 1.2\%$. Lo que sugiere una incrustación del mineral con una alta concentración de óxidos y silicatos.

Zapana (2020) realizó una investigación en las extracciones de litio mediante diversos métodos de lixiviación en tovas volcánicas ubicadas en el depósito Falchani de



Macusani, en la región de Puno. En este estudio, se llevó a cabo la caracterización del mineral con un tamaño granulométrico de $-212 \mu\text{m}$, con un porcentaje de malla pasante del 98%, utilizando una muestra de 2 kg. Los análisis se realizaron en una cantidad de mineral de 100 gramos, empleando el equipo ICP-OES/MS para determinar la ley del mineral, la cual se registró en 3171 ppm, equivalente al 0.68% de Li_2O . Además, se identificaron otros elementos presentes en la muestra, como: Al (7.13%), K (2.87%), Na (2.33%), Fe (0.55%), P (0.44%), Ca (0.25%), y U (5 ppm), entre otros.

Linquan et al. (2023) Realizaron la separación por flotación selectiva de espodumena y cuarzo con quitosano carboxilado como depresor, se empleó dodecilamina (DDA) como colector, el comportamiento de la flotación de la espodumena y el cuarzo a diferente pH utilizando solo con DDA a una concentración de $0.5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$, se observa que la recuperación del cuarzo aumenta rápidamente un rango de pH de 3 a 7, manteniéndose por encima del 80%. Por otro lado, para la espodumena, la recuperación aumenta en un rango de pH de 3 a 11, pero disminuye a pH más alto. Esto afecto la adsorción de DAA, dificultando su acción en la espodumena pero permitiendo su efectividad en el cuarzo, lo que resulto una significativa flotabilidad de ambos minerales.

Filippov et al. (2022) Abordaron la separación de lepidolita del mineral de pegmatita mediante procesamiento en seco y flotación. Encontró que la lepidolita, presente en texturas de grano grueso, permite la liberación de minerales de ganga como cuarzo y feldespato. Se realizó un proceso de molienda y tamizado para obtener una fracción rica en lepidolita, la cual se procesó con un separador electrostático. La flotación de la lepidolita se optimizó en un tamaño de partícula $-210/+63 \mu\text{m}$ siguiendo el procedimiento en la etapa de deslamado en esta etapa hubo una pérdida del 14.25% de Li_2O , durante la prueba de flotación, después de los 300 s, de un rango de pH entre 3.5,



se recuperó 77.1% de Li_2O con un porcentaje de concentrado de 4% de Li_2O con una ley de alimentación de 1.80% Li_2O , lo que corresponde a una mejora de 2.2 veces.

Huang et al. (2021) realizaron a cabo un estudio sobre la separación por flotación de espumas del mineral de lepidolita utilizando el colector surfactante Gemini como colector; en su investigación, caracterizaron el mineral proveniente de la mina Yichun en China mediante un análisis mineralógico, contenía en gran medida de 27,83% lepidolita, un 34.50% de albita, un 17.04% de cuarzo, un 7.15% de sericita, un 5.23% de feldespato potásico, un 5.06% de caolinita, un 1.37% de pirita, un 1.04% de ilminita y 0.69% de magnetita. Los experimentos de flotación se llevaron a cabo en una celda de flotación por espuma y optimizando las condiciones a un pH 3 y utilizando una dosificación de $2 \times 10^{-4} \text{M}$ de los colectores catiónicos de Dymethildodecylammonium bromide (HBDB) y dodecilamine (DA), con una cantidad de 150/350 g/ton. Se logró una recuperación del 54.97% de Li_2O utilizando DA y del 71.15% de Li_2O utilizando HBDB. Estos resultados sugieren que el HBDB tiene un excelente rendimiento de recolección de lepidolita y con una selectividad sobre los minerales de ganga.

Qian et al. (2021) Investigaron el mecanismo de co-adsorción selectiva de un nuevo colector mixto en la separación por flotación de lepidolita del cuarzo; las muestras mineralógicas provinieron de Yunnan, China y las muestras provenientes fueron trituradas, molidas y tamizadas en seco en un tamaño de partícula de $-74/+38 \mu\text{m}$. Posteriormente, las muestras fueron sumergidas en una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 10% de concentración durante 6 horas, filtradas, enjugadas repetidamente con agua ultra pura y se secadas. Luego, las muestras fueron mezcladas completamente y se almacenaron en botellas de vidrio para las pruebas de microflotación. Las muestras se realizó un análisis por fluorescencia de rayos X para determinar la composición química, determinaron la presencia de Al_2O_3 (24.53%), Na_2O (0.35%), Fe_2O_3 (0.043%), K_2O



(10.52%) y Si_2O (50.75%). Además, se llevó a cabo un análisis mineralógico con el equipo de DRX, contiene una buena concentración de lepidolita y cuarzo. Los experimentos de micro flotación se realizaron utilizando una máquina de flotación, a una velocidad de agitación de 1400 rpm, 2g de muestra y 35 ml de agua ultrapura en un recipiente de 40 ml. Tras 1 min de agitación, se ajustó el pH a 7 y se adicionó el colector DDA con una concentración de 0.647×10^{-6} M (12 mg/L). Los resultados mostraron una separación selectiva efectiva de lepidolita y el cuarzo en todo el rango de pH cuando se utilizó el colector DDA, la recuperación de lepidolita se mantuvo estable en un 90%. Por lo tanto, la recuperación por flotación de lepidolita y cuarzo fue factible en pH ácido (<3) y alcalino (pH=12), logrando una concentración del 2.65% al 4.99% de Li_2O .

Sousa et al. (2018) realizaron el proceso de flotación de los minerales de litio para obtener una concentración alta de Li_2O ; las muestras provenientes de Alvarroes – Goncalo (centro de Portugal) y consistieron en muestras mineralógicas de pegmatita con un tamaño de partícula superior a $>500 \mu\text{m}$. Estas muestras se caracterizaron, contenía albita, Li-moscovita, cuarzo y feldespato potásico como minerales principales, además de montebrasita, topacio, casiterita, columbo-tantalita, berilo y circon, cookeita, polucita e illita/esmectita, con una ley de 1.20 % Li_2O en $P_{80}=0.160\text{mm}$. La flotación de lepidolita se realizó a un pH de 2.5 con HF y agregaron 600g/t-1 del colector AERO 3030C para permitir la flotación del feldespato. Los resultados de las pruebas de flotación en escala laboratorio demostraron concentraciones de Li_2O de hasta un 4.7 %, lo cual indica una alta eficiencia para la metalurgia de compuestos de litio.

Tadesse et al. (2019) Efectuaron una revisión bibliográfica de las reservas de pegmatita de litio, donde las pegmatitas son rocas ígneas que están compuestas de granos de cuarzo, feldespato, espodumeno, mica y entre otros, donde los minerales de pegmatita de litio son: espodumeno, petalita, lepidolita, ambligonita, zinwaldita y eucryptita; la



química superficial del mineral, el tipo de colector, pH de la pulpa, pre tratamiento químico y de la presencia de arcillas.

Vieceli et al. (2016) investigaron el estudio cinético de la flotación por espuma aplicada al mineral de lepidolita. Donde establecieron un diseño factorial de experimentos de flotación por lotes, un conjunto de pruebas cinéticas para determinar el colector alternativo más selectivo. En un rango de pH de la pulpa 2, dosificación del colector 479 g/ton y el tiempo de flotación en 12 min. Los colectores (Aeromine 3000C y Armeen 12D) proporcionaron la eficiencia de separación (SE) en el valor máximo 91,51%; utilizando el modelo de segundo orden para los criterios de separación.

Demeusy et al. (2023) llevaron a cabo un estudio sobre la caracterización y liberación del mineral Beauvoir con el fin de recuperar las micas de litio. Este yacimiento se encuentra en el centro-noroeste de Francia y está compuesto principalmente por albita, cuarzo, feldespato potásico y micas, con una concentración de Li_2O del 1.3%. Para el estudio de análisis para detectar el litio (Li) deben de realizarse utilizando equipos como AAS, ICP-MS o LIBS. Destaco que el litio se encuentra alojado principalmente en las micas de la moscovita. Además, observo que el tamaño de liberación de las micas en Beauvoir parece ser variable, con valores entre 190 y 320 μm .



2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Litio

El litio es un elemento metálico, representado por el símbolo químico Li, es el primer elemento de la tabla periódica en el grupo de los metales alcalinos, su descubrimiento por primera vez en 1817 por el químico sueco Johan August Arfwedson, quien lo aislo a partir del mineral de petalita (Arfwedson, 1817). Con el descubrimiento del litio marco el comienzo de una nueva en la química, ya que se convirtió en un elemento clave en diversas aplicaciones industriales y científicas. Algunas de las propiedades químicas y físicas del litio se muestran en la tabla 1 entre sus propiedades físicas, se destaca su ligereza con una densidad de 0.534 g/cc, así como su punto de fusión de 180.54°C y punto de ebullición de 1342°C. el litio se representa como un metal blando, plateado y maleable, con una baja conductividad eléctrica.

En cuanto a sus propiedades químicas, el litio es altamente reactivo debido a su configuración electrónica, forman compuestos iónicos con otros elementos, como el cloruro de litio, el carbonato de litio y el hidróxido de litio (Winter, 2004). Además, el litio reacciona vigorosamente con el agua, generando el hidróxido de litio (LiOH) e hidrógeno gaseoso, mientras que con el oxígeno del aire forma el óxido de litio que vira de color blanco. También, el litio puro reacciona con el nitrógeno de la atmósfera para formar un compuesto de color marrón rojizo, el nitruro de litio (Li₃N) (Greenwood & Earnshaw, 1997). Por su baja densidad y peso ligero, lo que contribuye significativamente a la fabricación de baterías livianas y portátiles con alta densidad de energía, lo que lo convierte en un

componente esencial en el desarrollo de tecnologías de energía móvil y almacenamiento de energía (Whittingham, 2004).

Tabla 1

Propiedades químicas y físicas del litio

Propiedades	Litio
Numero Atómico	3
Peso Atómico	6.94 g/mol
Estructura Cristalina	<i>b. c. c.</i>
Constante de Red	3.5 Å
Densidad	0.534 g/cc
Punto de Fusión	180.54 °C
Punto de Ebullición	1342 °C
Radio atómico	1.56 Å
Radio iónico	0.68 Å
Potencial iónico	1.47
Potencial de ionización	5.39eV
Afinidad Electrónica	59.6 KJ/mol
electronegatividad	125 Kcal/atom.
Estado de Oxidación	0, - 1, +1
Configuración Electrónica	2S ¹

Fuente: Adaptación de Garrett (2004).

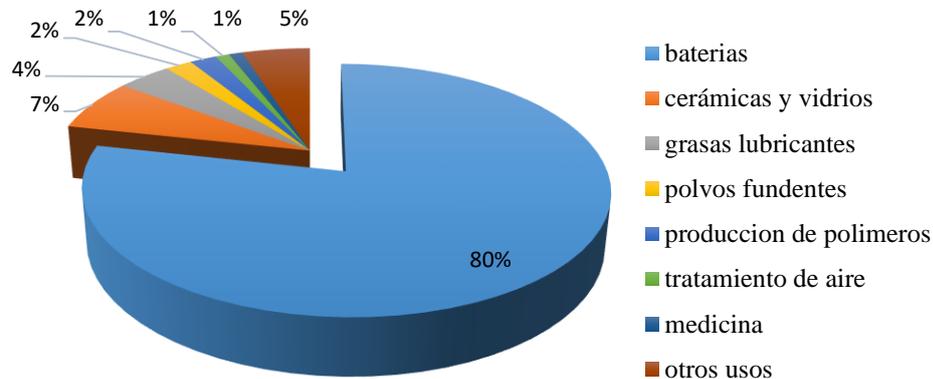
2.2.2. Uso del Litio

Los mercados de litio varían según su uso final y se estima de la siguiente manera: baterías 80%; cerámicas y vidrios 7%; grasas lubricantes 4%; polvos fundentes continuo 2%; producción de polímeros 2%; tratamiento de aire 1%; medicina 1% y otros usos 5% (USGS, 2023). En los últimos años, se ha registrado un notorio incremento en el uso de litio en las baterías, este aumento se debe al hecho de que las baterías recargables de litio son ampliamente empleadas en las

industrias del sector de vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos portátiles como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Productos finales de litio a nivel mundial



Fuente: USGS (2023).

2.2.3. Mineralogía de minerales con presencia de litio

Los minerales de litio suelen encontrarse en formaciones geológicas complejas llamadas pegmatitas, que son rocas ígneas intrusivas compuestas principalmente de minerales como cuarzo, feldespato, espodumena y mica (Tadesse et al., 2019). Además, indica en la naturaleza aparece formando aluminosilicatos, fosfatos, con haluros y boratos (Yang, 2020).

Los minerales que contienen litio, se muestra en la tabla 2, incluyen la espodumena, petalita, lepidolita, amblygonita, Zinnwaldita, triptonita y la Eucryptita cada uno con su composición química y contenido de Li_2O correspondiente (Colton., 1957; Grosjean et al., 2012).

Tabla 2*Minerales que contienen litio*

Mineral	Formula General	Li ₂ O (%)
Petalita	LiAlSi ₄ O ₁₀	2.27
Espodumeno	LiAlSi ₂ O ₆	3.73
Lepidolita	LiKAl ₂ F ₂ Si ₃ O ₉	3.56
Zinnwaldita	LiKFeAl ₂ F ₂ Si ₃ O ₁₀	1.7
Ambligonita	LiAlFPO ₄	4.74
Eucryptita	LiAlSiO ₄	5.53
triptonita	LiFePO ₄	4.40

Fuente: Colton., 1957; Grosjean et al., 2012.

Espodumeno: se trata de un piroxeno de estructura monoclinica que se presenta en forma de cadena única que contiene silicato de litio, aluminio y es una roca dura, se encuentra las reservas de pegmatitas en asociación con otros minerales de silicato como feldespato, mica y cuarzo (Bulatovic, 2015). La espodumena se concentra comúnmente en medios pesados por separación, flotación por espuma y/o separación magnética, antes del proceso de lixiviación el espodumeno natural (α -espodumeno) se convierte en β -espodumeno es irreversible al calentamiento de aproximadamente 1000 a 1100°C, que es más susceptible de ataque químico (Rosales et al., 2014). Las reservas de espodumena se encuentran mayormente en: Greenbushes en Australia occidental es la más grande mina de litio en el mundo de la que se extrae concentrado de litio de alto grado de recuperación de la espodumena (Garrett, 2004).

Lepidolita: es una mica con composición compleja y variable, se utiliza principalmente como un concentrado para la producción de vidrios y cerámicas, su contenido de litio puede variar de 1.39% Li (3.0% Li₂O) a 3.58% Li (7.7%Li₂O); así mismo, vira de color rosa a violeta grisáceo y tiene una densidad



de 2.8 – 3.0 g/cc; la lepidolita se asocia principalmente con litio y rubidio es una fuente de mineral de rubidio (Wietelmann & Bauer, 2003). Los principales minerales de la ganga que se encuentran asociados a la petalita son la calcita, moscovita, feldespato y cuarzo, que deben de separarse por flotación (Choi et al., 2012). Las principales reservas de lepidolita se encuentran en Bikita, Zimbabue; Canadá, Portugal, y Argentina (Garret, 2004).

Petalita: es un mineral cristalino monoclinico con una estructura de silicato, vira de color blanco a blanco grisáceo, con una densidad de 2.4 g/cc y una dureza de 6 Mohs, su contenido teórico de litio de la petalita es de 2.27% Li (4.88% de Li_2O) aunque el contenido de Li en muchas reservas varia de 1.4 a 2.2% de Li (3.0 – 4.7% de Li_2O); así mismo la petalita generalmente se asocia con otras pegmatitas como espodumeno, eucryptita y lepidolita (Garrett, 2004). El calentamiento de la petalita a altas temperaturas lo convierte a tetragonal β -espodumeno que es reactivo al ataque acido o base (Tadesse el al., 2019). Las grandes reservas de petalita se encuentran en Bikita, Zimbabue; Kenora, Ontario, Canadá; Brasil; y Londonerry, Australia. También se ha informado una cantidad significativa de petalita en Karibib, Namibia (Garrett, 2004).

Amblygonita: es el miembro final rico en flúor de un grupo aluminofosfato de litio; su contenido teórico de litio es de 4.76% de Li (10.2% de Li_2O); La amblygonita vira de un color blanco lechoso a gris y tiene una densidad de 2,98 – 3.11 g/cc (Garrett, 2004). Para la separación se realiza en medios densos y por la flotación de otros minerales de litio y ganga de silicatos (Bulatovic, 2015). Sin embargo, se encuentran las reservas de amblygonita en Canadá, Brasil, Surinam, Zimbabue, Ruanda, Namibia y Sudáfrica (Garrett, 2004).



Zinnwaldita: es considerado como una variedad impura de la lepidolita con contenido relativamente alto de hierro (hasta 11.5% de Fe como FeO) y MnO (3.2%) (Paukov et al., 2010), tiene propiedades magnéticas significativas debido a un contenido relativamente alto de hierro seguida de lixiviación con agua y precipitación puede producir un concentrado de Li_2CO_3 de >99 % de pureza (Jandova et al., 2009). Las reservas más significativas de Zinnwaldita se encuentra en la Republica Checa/ Cinovec, Erzgebirge en la frontera entre Alemania y Chequia, con un 67% en peso de cuarzo, 20% en peso de Zinnwaldita, 8% en peso de topacio, 3% en peso de moscovita y 2% en peso de minerales traza (por ejemplo, Caserita, wolframita, caolinita, columbita y limonita) (Chelgani et al., 2015; Leißner et al., 2016; Wietelmann & Bauer, 2003).

Eucryptita: es una fuente importante de litio que contiene un promedio de 2,1 a 3,0 % de Li (4,5 a 6,5% de Li_2O); se usa para la fabricación de vidrio (Tadesse et al., 2019). Se encuentran las reservas de Bikita, Zimbabue tiene un promedio de 2.34% de Li (5.0% de Li_2O), se encuentran en pequeños tonelajes (Garret, 2004).

2.2.4. Mineralogía de tobas

La concesión Falchani, administrada por Plateau Energy Metals, se encuentra situado en el sureste del Perú, en el departamento de Puno, en el distrito de Macusani, provincia de Carabaya, como se muestra en la figura 2. Según el informe técnico de evaluación económica preliminar del proyecto de litio Falchani (2020), esta concencion alberga un deposito de litio que se presenta en forma de tobas acidas asociada con mineral de uranio. Los Análisis mineralogicos realizados por la concesion, indican la presencia de minerales como cuarzo, la

ortoclasa y la plagioclasa en estas tobas, en sus estudios petrográfico indican que estas rocas son de naturaleza volcánica acida, con una composición variable, desde la riolita hasta la dacita y latita, lo que respaldaron su origen volcánico. Además, El laboratorio SGS destacan que estas tobas son rica en litio, presentando una textura de grano muy fino y con tonalidades que van desde el gris claro a blanco.

Figura 2

Ubicación de la concesión Falchani – Macusani – Puno



Fuente: Falchani Lithium Proyec NI 43-101 Technical Report-Preliminary Economic Assessment (2020), p.28.

Según los análisis realizados por Fisher y Schmincke en su obra “Pyroclastic Rocks” (1984), las tobas volcánicas suelen estar compuestas por una cantidad de minerales, siendo los más comunes el cuarzo, las plagioclasas, los



feldespatos y las micas todo este conjunto de componentes son rocas ígneas de origen explosivo que se forman a partir de cenizas volcánicas expulsadas durante las erupciones volcánicas.

2.2.5. Minerales de ganga

Los minerales de ganga son aquellos que se encuentran junto al mineral de interés en una mena, algunos de los minerales de ganga más comunes incluyen el cuarzo, la calcita, albita y la microlina tienen poca importancia comercial (Fairbanks, 1981), la identificación de los minerales de ganga son aspectos importantes en el procesamiento de minerales ya que pueden afectar significativamente en la eficiencia de la operación.

2.2.6. Flotación

La flotación es una técnica de separación fisicoquímica que se basa en las propiedades químicas de la superficie de los minerales, las cuales pueden ser modificadas mediante el uso de reactivos específicos. Además, en sus propiedades físicas como el tamaño de las partículas, el control del flujo de aire para lograr el tamaño adecuado de las burbujas (caudal del aire) y el diseño apropiado de la máquina de flotación (Wang et al., 2014).

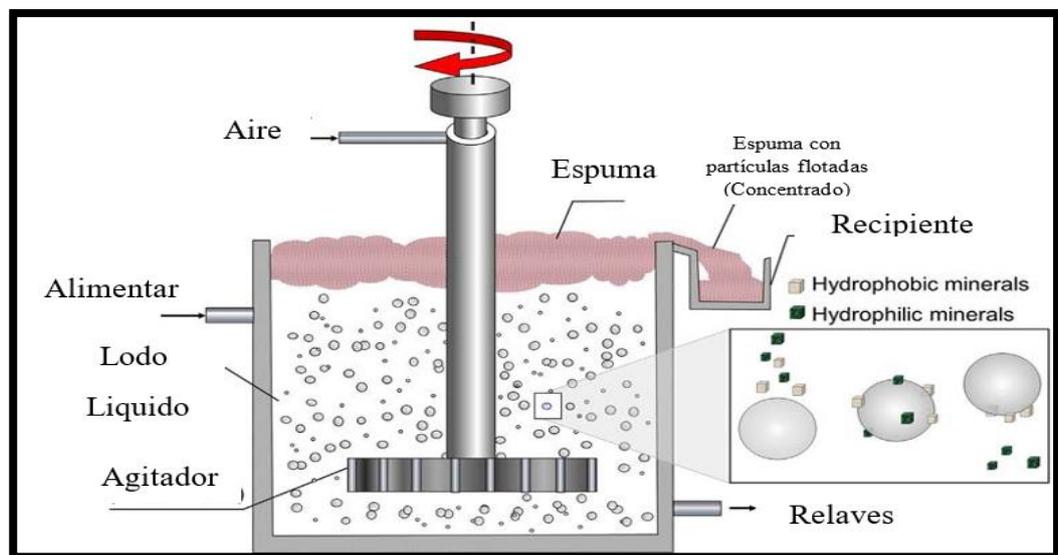
2.2.7. Consideraciones y el proceso en la flotación

Las consideraciones que se deben de tomar en cuenta son las propiedades superficiales de los minerales, algunos minerales su superficie se humedecen fácilmente con agua se denomina hidrofílicos, mientras que algunos minerales repelen al agua se denomina hidrofóbico, además, se requiere el análisis mineralógico para identificar la especie mineralógica (Wills, 2016). El proceso

general de la flotación se muestra en la figura 3, se ilustra un diagrama esquemático de la celda de flotación mecánica; durante la flotación el aire se introduce a través de un eje y el impulsor lo convierte en burbujas de aire, asimismo también sirve para agitar la pulpa y mantener las partículas suspendidas, con la adición de reactivos químicos a la pulpa, las partículas hidrófobas se adhieren a las burbujas de aire y suben hacia arriba contra la gravedad hasta la zona de espuma para su separación, la espuma se desborda al recipiente donde las partículas hidrófobas se recogen como un concentrado y los minerales hidrofílicos se recolectan como relaves del fondo de la máquina de flotación (Wills, 2016, citado por Buthelezi, 2020).

Figura 3

Principio de la flotación



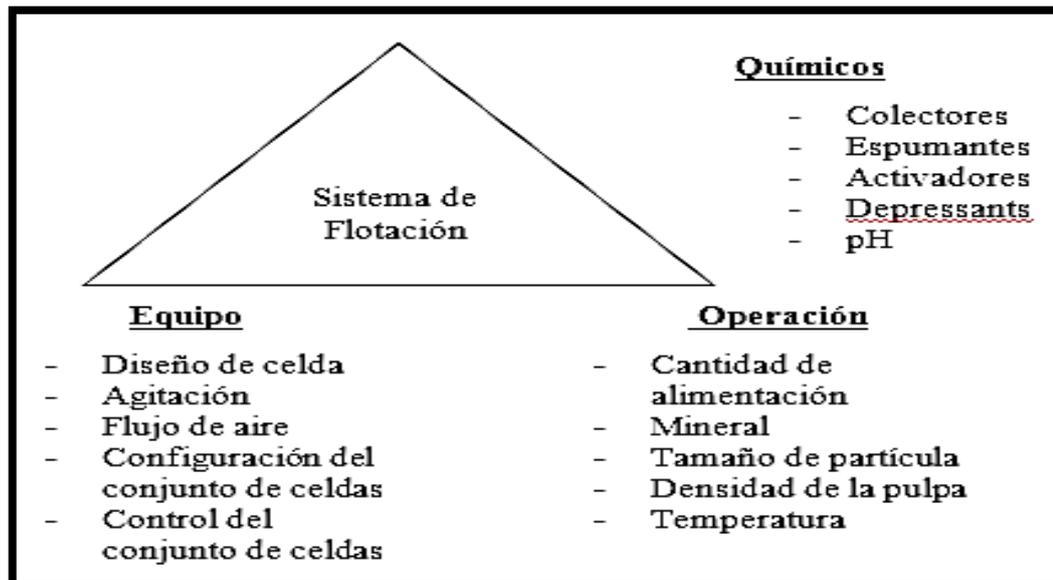
Fuente: Wills (2016).

Por otro lado, según Klimpel (2003) es importante tener en cuenta estos parámetros se dividen en tres grandes grupos que corresponden a la naturaleza física, química y operación del proceso. Estos parámetros interactúan de manera

interdependiente, conformando un triangulo esencial para comprender el funcionamiento del proceso. La figura 4 ilustra de manera clara los parámetros principales del sistema de flotación.

Figura 4

Las variables interrelacionados a la flotación



Fuente: Klimpel (2003).

2.2.8. Química superficial de minerales de silicato.

Los minerales de silicato son generalmente hidrofílicos (el talco es una excepción), para alterar la química de la superficie de los minerales de silicato se induce utilizando colectores. Además, se utilizan otros tensioactivos para garantizar la máxima separación durante la flotación. Estos tensioactivos incluyen depresores, dispersantes y activadores (Wills, 2016; Buthelezi, 2020).

2.2.9. Colectores

Los colectores son compuestos orgánicos que mejora la hidrofobicidad por adsorción de la superficie del mineral. Es decir, al añadir los colectores a la pulpa



y se deja un tiempo para que se adsorban durante la agitación en lo que se conoce como periodo de acondicionamiento va reduciendo la estabilidad de la capa hidratada del mineral que separa la burbuja de aire, hasta un nivel que se pueda fijar la partícula a la burbuja (wills, 2016, p. 269). Los minerales óxidos y silicatos son hidrófilos; en consecuencia, se requiere un colector que tenga un carácter fuertemente hidrófobo, esto se logra mediante el uso de un colector que tenga una cadena hidrocarburos más larga en la molécula (Robinson, 1973) para este tipo de minerales se pueden clasificar en colectores catiónicos y aniónicos.

Colectores catiónico: Estos colectores se basan en nitrógeno pentavalente, siendo las aminas primarias (grasas) y las aminas éter (Nagaraj & Ravishankar, 2007). La cadena hidrocarbonada suele ser entre 12 y 24 átomos de carbono, se utilizan principalmente para los minerales no sulfuros (Wills, 2016, p. 270). En la tabla 3 se muestran los tipos de colectores para los minerales de silicatos y óxidos.

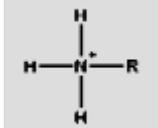
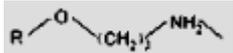
Colectores aniónicos: Los colectores aniónicos son de dos tipos: sulfhidrilo y oxhidrilo, el término sulfhidrilo se refiere al grupo R-SH y se utilizan para los minerales sulfurados, mientras que el oxhidrilo (referido al grupo OH), se utilizan principalmente en la flotación de minerales no sulfurados (Wills, 2016, p. 270).

Según Wills (2016, p.271), es importante tener cuidado con una dosificación excesiva del colector, ya que puede provocar problemas de estabilidad de la espuma. Estos problemas van desde la inmovilidad hasta el colapso e incluso inducir la agrupación de burbujas en la pulpa. Esta agrupación de burbujas, también conocida como “conjunto de burbujas puenteadas por

partículas”, tiene el potencial de atrapar la ganga. Por otro lado, el aumento en la longitud de la cadena del radical hidrocarburo incrementa el nivel de hidrofobicidad impartido a la partícula, lo que hace que el colector sea más potente, pero a menudo con menor selectividad. Por lo tanto, los colectores se utilizan en pequeñas cantidades.

Tabla 3

Colectores para minerales de silicatos y óxidos.

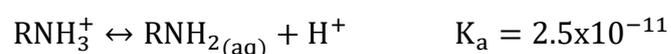
Colector	Formula General	Longitud de la cadena radical	Referencia del mineral a flotar
Amina Primaria		C12-24	Widely uso para, cuarzo, ZnO, Ti, Sn.
Éter Amina		C6-13	Cuarzo y silicato de aluminio.

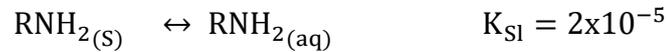
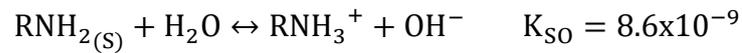
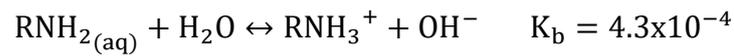
Fuente: Wills (2016, p. 271).

Colectores para minerales no sulfurados.

a) Colectores amina

La dodecilamina (DA) es una amina primaria de 12 carbonos, cuya estructura se muestra en la figura 15. La disolución e hidrolisis de una amina primaria se representan mediante las siguientes reacciones:





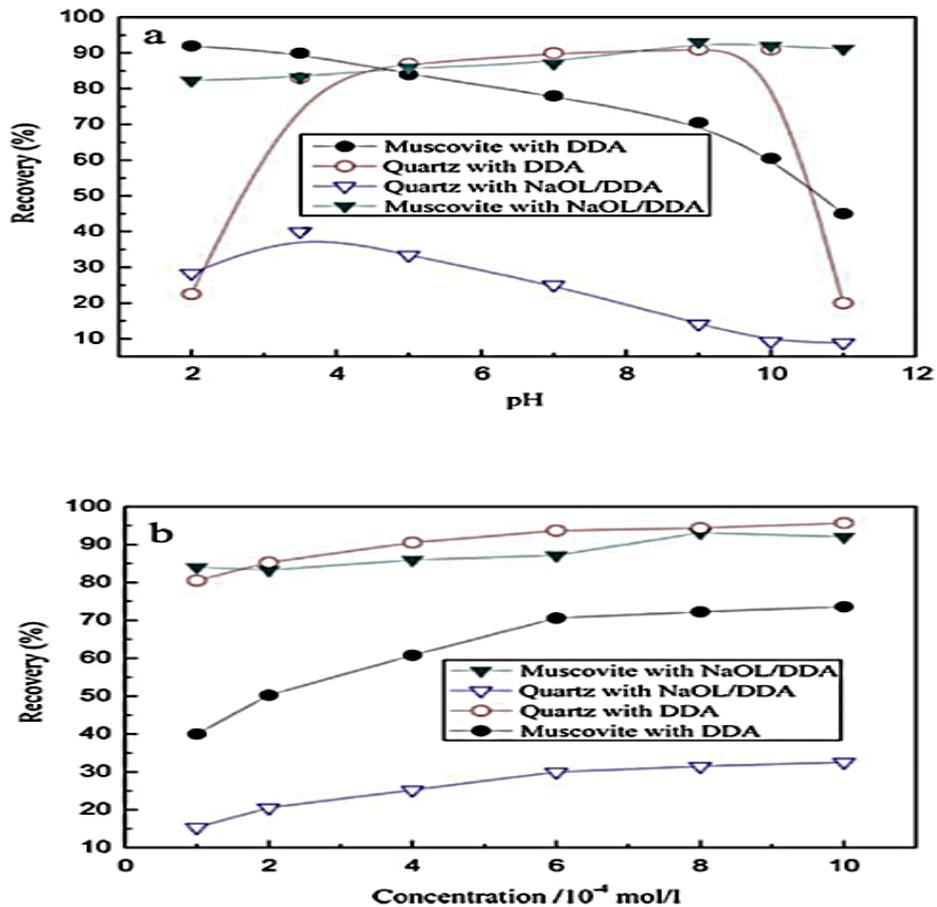
b) Colectores combinados (Colectores catiónicos/aniónicos)

Según Wang et al. (2014), la combinación de oleato de sodio (NaOl) y dodecilamina (DA) permite la flotación selectiva de moscovita a partir de cuarzo en condiciones básicas. A diferencia de los aluminosilicatos (sillimanita, cianita y andalucita), tanto la moscovita como el cuarzo no flotan en presencia de NaOl solo. Como se muestra en la figura 5, la recuperación de moscovita usando colector NaOl/DA se mantienen por encima del 80% para un amplio rango de valores de pH y concentración del colector, mientras que la recuperación de cuarzo usando NaOl/DA permanece baja (<40%) para todo el rango investigado de pH y concentración del colector. La recuperación de cuarzo a pH alcalino, alrededor de pH 10 es baja (<10%) y la recuperación de moscovita es alta (>90%). Esta diferencia en la recuperación muestra que la eficiencia de separación utilizando un sistema de colector es alta en condiciones alcalinas. El mecanismo de adsorción del colector se delinea usando FTIR, mediciones de potencial zeta y XPS, FTIR y XPS respaldaron la adsorción selectiva del colector mixto NaOl/DA en moscovita. Además, XPS indicó que la química adsorción está involucrada en el mecanismo de adsorción del colector mixto.

Figura 5

Recuperación por flotación de moscovita y cuarzo con DDA, NaOl y mezcla

NaOl/DDA en función del pH (a) y la concentración (b)



Fuente: Wang et al. (2014, p. 31).

2.2.10. Espumantes

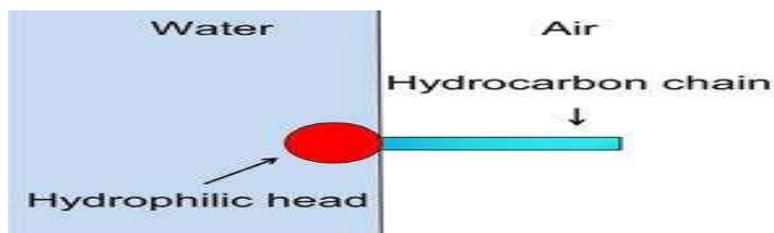
los espumantes son compuestos químicos que se utilizan durante la flotación ayuda a la formación y conservación de las burbujas de aire, lo que contribuye a mantener una espuma adecuada para transportar las partículas de minerales valiosos desde la pulpa hacia la superficie de la celda de flotación, donde pueden ser recolectadas y separadas (Klimpel & Isherwood, 1991). La función principal de los espumantes es reducir la tensión superficial en la interfaz

aire-agua, lo que facilita la formación de burbujas y estables, esta reducción en la tensión superficial permite que las burbujas se adhieran más fácilmente a las partículas de mineral y evite su coalescencia, lo que garantiza una distribución uniforme de las partículas en la espuma (Wills, 2016, p. 279).

Los espumantes se caracterizan por su estructura molecular, la cual consiste en una cola hidrofóbica y una cabeza hidrofílica, en la figura 6 se muestra su estructura, donde la cola hidrofóbica está orientada hacia la burbuja de aire y la cabeza hidrofílica hacia el agua (Wills, 2016, p. 280).

Figura 6

Estructura general de la molécula del espumante



Fuente: Wills (2016, p. 270).

Los espumantes más utilizados en la flotación de minerales son los alcoholes, como el metil isobutil carbinol (MIBC) y los poliglicoles (Klimpel et al., 1991). Según Pugh (2007), los éteres MIBC y polipropilenglicol (PPG) representan más del 80% de los espumantes empleados en la flotación de minerales metálicos. La figura 7 muestra la estructura química del MIBC, ilustrando su composición molecular.

Figura 7

Estructura del espumante MIBC.



Fuente: Wills (2016, p. 279).

2.2.11. Reguladores

Los reguladores, también conocidos como modificadores, son reactivos que alteran la acción del colector, ya sea intensificando o reduciendo su efecto de hidrofobicidad sobre la superficie del mineral. Según Wills, (2016, p. 285), se clasifican como activadores, depresores y dispersantes

Los activadores son generalmente sales solubles que se utilizan para alterar la superficie del mineral objetivo y aumentar la intensidad de los colectores. Por ejemplo, en la flotación inversa de sílice a partir de minerales de hierro utilizando un colector aniónico, se introduce iones de Ca para adsorberse el sílice y altera la carga superficial a positiva, lo que permite la adsorción del colector a través del mecanismo electrostático (Houot, 1983, citado por wills, 2016, p. 282). De manera similar, en la flotación de feldespato a partir del cuarzo con un colector catiónico



a pH ácido, se añade fluoruro como activador, el fluoruro reduce selectivamente la carga negativa del feldespato en comparación con el cuarzo, promoviendo así la adsorción del colector catiónico (Shergold, 1984, citado por Wills, 2016, p.282).

Por el contrario, los depresores se utilizan para retener un mineral alterando su superficie a hidrófila, evitando así su flotación (ejemplo CH_2O^- y COO^- para no sulfuros). Ambos reactivos se utilizan simplemente para aumentar la diferencia de hidrofobicidad entre los minerales con el fin de aumentar la selectividad y la eficiencia del colector (Wills, 2016).

Depresores inorgánicos, se han probado o que se emplean actualmente en minerales que contienen silicatos incluyen HF, HBr, Na_2SiO_3 y Na_2CO_3 . Estos depresores tienen sus inconvenientes, incluidos problemas relacionados con las consideraciones ambientales o la falta de selectividad (Buthelezi, 2020).

Un estudio de Chaib (2016) demostró que es posible activar los feldespatos y deprimir el cuarzo usando ácido bromhídrico (HBr). El estudio se realizó mediante pruebas de flotación por lotes y se demostró que la ley y la recuperación de feldespato en el concentrado fueron mayores con HBr como modificador que con HF, siendo además más favorables desde el punto de vista ecológico.

Por último, los depresores orgánicos como el almidón, la dextrina, la carboximetilcelulosa (CMC), el ácido húmico y el hexametáfosfato de sodio han sido reportados como depresores efectivos de los minerales de óxido, calcita, barita, fluorita, talco y cuarzo (Shrimali et al., 2018).



2.2.12. pH

El pH de la pulpa es un factor que influye en diversos aspectos del proceso de flotación, como señala (Wills, 2016). Este parámetro controla la adsorción de los colectores. Por consiguiente, el pH juega un papel fundamental en la flotación selectiva, lo que lo convierte en un factor fundamental de la flotación selectiva y la eficiencia en el proceso. Para ajustar el pH de la pulpa, se utilizan modificadores tales, como el ácido sulfúrico, el hidróxido de sodio, el ácido clorhídrico, la cal y la ceniza de sosa.

2.2.13. Componentes de la constante de velocidad

La constante de velocidad en la flotación está determinada por diversos factores, que incluyen las contribuciones de la máquina, las partículas y la espuma (Wills, 2016).

- **Máquina:** Responsable de generar burbujas y facilitar la colisión entre estas y las partículas en suspensión.
- **Las partículas:** Refleja las características intrínsecas de las partículas, como su tamaño, composición y grado de hidrofobicidad.
- **Espuma:** la estabilidad y calidad de la espuma se logran manipulando el flujo de aire en las celdas de flotación, lo que afecta directamente en la formación y estabilidad de la espuma.

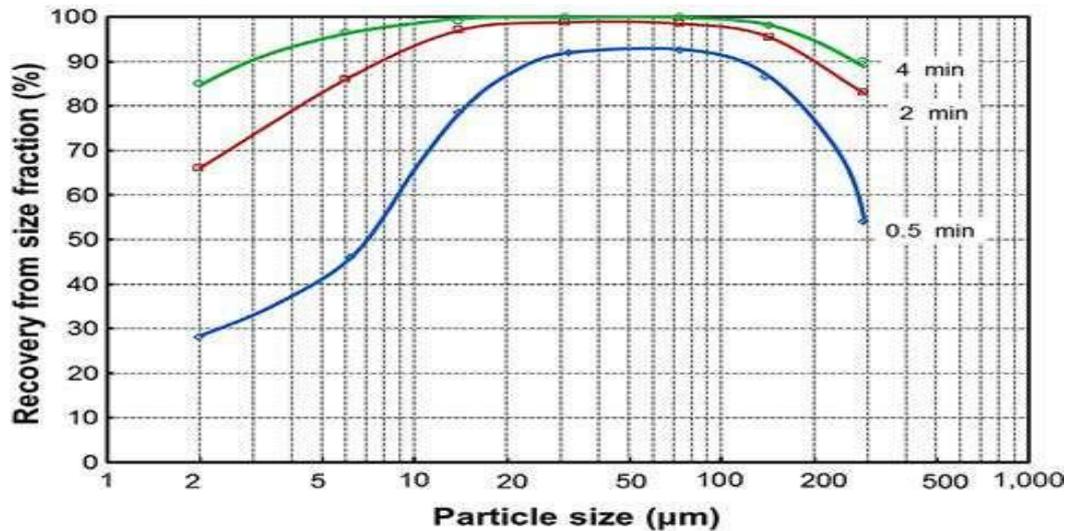
2.2.14. El papel del tamaño de las partículas y liberación

La flotación depende del tamaño de las partículas, la figura 8 muestra tres clases de tamaño: un tamaño intermedio donde la recuperación es alta; un rango

de tamaño fino donde la recuperación es menor y un rango de tamaño grueso donde la recuperación es nuevamente menor con respecto con el tiempo (Wills, 2016, p. 301).

Figura 8

Tendencia de recuperación típica en función del tamaño de partícula y el tiempo



Fuente: Adaptado de Trahar (1981), citado por Wills (2016, p. 302).

Por otro lado, el análisis de fraccionamiento de mallas realizado por Liu et al. (2020) realizó una relación directa entre el tamaño de la malla y el contenido de óxido de litio (Li_2O). La tabla 4 presenta los resultados del tamizado del mineral en cinco fracciones diferentes, cada una corresponde a un rango de tamaño de malla específico, se observa que a medida que aumenta el número de abertura de la malla, también aumenta el contenido de Li_2O en las fracciones de malla.

Tabla 4*Tamizado del mineral en 5 fracciones*

Numero de malla (μm)	Fracción	Li_2O
<44	13.45%	0.90%
74 – 44	12.98%	0.86%
105 – 74	18.51%	0.97%
250 – 105	25.78%	1.56%
>205	29.28%	1.71%

Fuente: Liu et al. (2020, p.3).

Ademas, Viécely et al. (2016, p. 6) realizaron un analisis del tamaño de las particulas, asi como el contenido de litio y rubidio en cada fraccion de tamaño. Los resultados se presentan en la tabla 5, donde se observa que los mayores contenidos de litio se encuentran en el rango de tamaño de particula de $-125 \mu\text{m}$, mientras que los contenidos mas bajos se encuentran en la fraccion de tamaño de particula pasante $-32 \mu\text{m}$. en cuanto al rubidio, sus concentraciones son mayores en la fraccion de tamaño intermedio ($-250 \mu\text{m}/ +63 \mu\text{m}$).

Tabla 5*Distribución del tamaño de partículas y contenido de rubidio y litio.*

Tamaño de partícula (μm)	peso retenido %	peso Pasante %	Li Wt%	Li %	Rb Wt%	Rb %
-500 +355	22.79	100	1.14	19.6	0.31	16.58
-355 +250	16.07	77.21	1.31	15.78	0.35	15.25
-250 +180	19.87	61.13	1.41	21.01	0.39	21.86
-180 +125	13.03	41.26	1.52	14.89	0.43	16.75
-125 +90	10.29	28.23	1.53	11.85	0.32	13.43
-90 +63	7.19	17.94	1.46	7.88	0.29	8.5
-63 +45	3.97	10.75	1.31	3.9	0.27	3.78
-45 +32	2.28	6.78	1.22	2.08	0.23	1.87
-32	4.5	4.5	0.89	3.01	0.2	1.98
Total	100	...	1.33	100	0.34	100

Fuente: Viecey et al. (2014, p.6)

2.2.15. Deslamado

Las partículas finas por debajo de los 50 μm , forman un lodo lo que en realidad transporta las burbujas que conlleva un aumento en el consumo de reactivo y aumenta el tiempo de flotación y no es favorable, para ellos se realiza el proceso de deslamado es un mecanismo de recuperación de partículas finas (Wills, 2016).



Según Vieceli et al. (2016), llevo a cabo una etapa de deslamado antes de la operación de flotacion, que consiste en la eliminacion de particulas finas y ultrafinas (tamaño inferior a 30 μm) lo que se considera como lodo y se realiza utilizando el metodo de " decantacion en vasos", tal como lo describe (Wills, 2016). La decantacion en vasos es una etapa de remocion de lodos (deslamado) como un metodo de sedimentacion que permite separar las particulas mas finas (agua sobrenadante y solido), lo que ayuda a mejorar la calidad de la alimentacion para la flotacion.

2.2.16. Variables controladas en el proceso de flotación

La variable clave a controlar en la investigación son las siguientes (cooper et al. 2004, citado por Wills, 2016, p.347):

- **Porcentaje de sólidos en la alimentación (% S):** este factor influye la eficacia del proceso de flotacion, afectando directamente la densidad de la pulpa.
- **Altura de la espuma:** controla el arrastre y las leyes de los minerales, una altura adecuada garantiza una separacion eficiente entre la espuma y la pulpa, evitando la perdida de minerales valiosos.
- **El nivel de la pulpa en la celda:** mantener un nivel optimo de pulpa en la celda de flotacion es fundamental para garantizar un rendimiento estable y eficiente del proceso.
- **El caudal del aire en las celdas de flotación:** el caudal de aire controla la generacion de burbujas de aire, que son esenciles para el proceso de flotacion. Ajustar adecuadamente este parametro garantiza una distribucion uniforme de



las burbujas en la pulpa, lo que mejora la eficiencia de la separación de minerales.

- **El control de pH:** el pH de la pulpa influye significativamente en la selectividad de la flotación, especialmente en la separación de minerales no deseados. Mantener un pH óptimo ayuda a maximizar la recuperación de minerales valiosos mientras se minimiza la recuperación de impurezas.
- **Adición del colector:** el colector es un reactivo importante en el proceso de flotación que ayuda a la selectividad al adsorber en la superficie de los minerales de interés. El control preciso de la dosificación del colector garantiza una recuperación óptima de los minerales valiosos.
- **La cantidad de espumante** el espumante es necesario para estabilizar las burbujas de aire en la pulpa. Las bajas concentraciones del espumante forman burbujas grandes y son inestables, lo que conduce a baja recuperación del mineral a flotar. Por otro lado al aumentar la concentración del espumante, se observa la eficacia de la flotación.

2.2.17. Pruebas de flotación por lotes

Las pruebas de flotación por lotes generalmente se realizan con cantidades de mineral de 500 g, 1 Kg a 2 kg . Estas pruebas se llevan a cabo en laboratorios utilizando una celda mecánica, como se muestra en la figura 9, donde se muestra una prueba de flotación por lotes realizada en un laboratorio con una celda Denver. En este proceso, el aire se introduce a través de un impulsor y se controla mediante una válvula. Las burbujas se producen gracias a la acción de corte del impulsor, el cual también agita la pulpa para mantener las partículas en suspensión. Antes

de la inducción del aire, la pulpa suele requerir acondicionamiento con reactivos para que las partículas alteren la superficie del mineral a flotar (Wood, 2002).

Figura 9

Pruebas de flotación por lotes usando una celda Denver



Fuente: Wood (2002).

Para llevar a cabo estas pruebas de manera efectiva, es importante considerar varios puntos (Wood, 2002).

- Agitación de la pulpa debe ser lo suficientemente vigorosa para mantener todos los sólidos en suspensión.
- A menudo, se requiere el acondicionamiento de la pulpa con reactivos, implica un periodo de agitación que puede variar desde unos pocos segundos hasta varios minutos, antes de que se encienda el aire.



- La profundidad de la espuma debe estar entre 2 y 5 cm.
- Las pruebas por lotes generalmente requieren cantidades minimas de reactivo, las cuales se deben de utilizar la micropipeta.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

3.1.1. Ubicación geográfica del estudio

El punto de estudio se basó en muestras mineralógicas extraídas por la Empresa Macusani YellowCake, por una cantidad de peso aproximado de 20 Kg. Estas muestras fueron muestreadas mediante el método de trinchera a tajo abierto, por cada (01) un metro de profundidad. La muestra extraída está ubicada al noreste del centro poblado de la comunidad campesina Chacaconiza, en el distrito de Macusani, Provincia de Carabaya, Región de Puno, en la cordillera de los Andes, caracterizada por su formación montañosa (Ver anexo 13), se ubica a una altitud de 4764 metros sobre el nivel del mar y provienen de las siguientes coordenadas geográficas UTM (WGS 84) de Este: 318368, Norte: 8451673, Zona: 19L.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. Materiales

- 01 caja de guantes de material nitrilo, marca Favetex y origen: Malasia, calidad certificada ISO 13485:2016.
- 01 Piceta de Material: Polipropileno y de Marca: Premier.
- 01 cinta masking tape
- 01 cinta embalaje de material: Polietileno
- Papel filtro Whatman # 125mm
- 01 cuaderno de apuntes.



- Bolsas de plástico material polietileno.
- Manta para cuartear la muestra material polietileno de alta densidad.
- Regla para cuarteo
- Cuchara de cuarteo
- 2 combos con mango de madera, cabeza de acero, marca STANLEY.
- 1 cincel frio de material metálico.

3.2.2. Materiales de vidrio

- Probetas: (10, 100, 1000 mL.) material pyrex, marca Kyntel y origen China.
- Pipetas: (5 mL. – 10 mL.) material pyrex, marca Kyntel y origen China.
- Matraces: (esmerilado de 250 mL.), material pyrex, marca Kyntel y origen China.
- Luna de reloj.
- 12 Bandejas metálicas.

3.2.3. Equipos

- Chancadora de quijada 5”X8”
- Molinos de bolas de laboratorio TYPE YC90S-4
- Estufa de secado 0°C – 80°C marca memmert
- Balanza digital SCIENTECH Capacidad 410 g
- Cuarteador de Jones
- Tamizadora ASTM con mallas: #100, #140.
- Equipo ROTAP.
- Micro pipeta



- Máquina de flotación marca Denver
- Celda de flotación de capacidad de 2 litros
- Medidor de pH
- Cronometro
- Difraccion de rayos X
- Fluorescencia de rayos X

3.2.4. Reactivos de flotación

- Dodecylamina solucion de concentracion de 0.000035M y 0.000015M, Merck Peruana S.A., Lima, Perú.
- Isobutyl methyl carbinol 98%
- Ácido sulfúrico (98%) a una solucion al 10%, Factory, Liaoning, china
- Hidróxido de sodio al 5%, Factory, Liaoning, China

3.2.5. Equipos de protección personal (EPP)

- Bata de laboratorio color blanco
- Guantes de nitrilo desechable
- Mascarilla de silicona 3 M
- Respirador para gases y polvo (cartuchos 3M)
- Gafas de seguridad 3M
- Tapón de seguridad 3M
- Calzado de seguridad

3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.3.1. Preparación mecánica

a. Reducción física del mineral bruto

La muestra mineralógica proveniente fueron de fragmentos grandes, con dimensiones promedio de aproximadamente 25 cm de largo y 13 cm de ancho, los cuales no eran adecuados para introducir a la trituradora de mandíbulas. Por lo cual fueron reducidos manualmente utilizando un combo y un cincel para fragmentar los trozos hasta alcanzar un tamaño aproximado de 8 cm (ver figura 10), este tamaño fue considerado de acuerdo a la abertura de la trituradora de mandíbulas, la cual tenía una capacidad máxima de fragmentos de hasta 8.5 cm, como se muestra en la figura 11. Una vez reducido manualmente los trozos del mineral a un tamaño adecuado, se dispusieron en una bandeja. Posteriormente, estos fragmentos se enviaron a la trituradora de mandíbulas.

Figura 10

Reducción del mineral manualmente





b. Trituradora de mandíbulas

Se procedió al pesaje del mineral, que previamente habían sido reducidos manualmente con peso de 19 Kg. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de limpieza de la trituradora de mandíbulas, como se observa en la figura 11, utilizando cuarzo y una compresora para eliminar cualquier residuo.

Para reducir el tamaño del mineral menor a <0.5 cm, se siguió las recomendaciones de (Wills, 2016), se utilizó la trituradora de mandíbulas cuyas características se detallan en la tabla 6. Esta trituradora de mandíbulas cuenta con una abertura de alimentación de 8.5 cm de ancho por 17.4 cm de largo y una altura de la mandíbula fija de 28.8 cm, mientras la abertura de salida varía entre 1.5 cm de ancho máximo y 0.5 cm de ancho mínimo, manteniendo una longitud constante de 17.4 cm de la abertura de salida no varía. A medida que el mineral es triturado realiza un movimiento de adelante y hacia afuera en un movimiento oscilante de una mandíbula móvil, que comprime el mineral contra una mandíbula fija y se tritura el mineral. Las partículas mineralógicas más pequeñas pasan a través de la abertura inferior de la trituradora, cuyo tamaño de abertura de salida es menor a 0.5 cm para obtener el producto triturado final. Mientras tanto, las partículas más grandes continúan siendo trituradas hasta alcanzar el mismo tamaño de salida menor a 0.5 cm. Una vez completado este proceso, las muestras mineralógicas trituradas con un tamaño menor a 0.5 cm, se envían al molino de bolas para continuar con la etapa de molienda.

Figura 11

Trituradora de mandíbulas



Tabla 6

Características de la trituradora de mandíbulas

Características de la trituradora de mandíbulas	Dimensiones
Dimensiones de la abertura de alimentación (cm)	
- Ancho	8.5 cm
- Largo	17.4 cm
Ancho máximo de la rendija de salida (cm)	1.5 cm
Ancho mínimo de la rendija de salida (cm)	0.5 cm
Numero de oscilaciones	1740 rpm
Motor	5 HP

Fuente: Recopilación de información del Equipo de Trituradora de Mandíbulas.

c. Molienda del mineral en el molino de bolas

Se procedió con el pesaje del mineral triturado con un peso de 18.8 Kg, en seguida, se realizó la etapa de molienda del mineral triturado utilizando un molino de bolas, como se muestra en la figura 12. Antes de realizar la molienda del mineral, se hizo la limpieza del molino de bolas utilizando arena sílice de

granulometría de malla #20, con una cantidad de 20 kg por un tiempo de 30 minutos. Este procedimiento se realizó para evitar la contaminación de la muestra representativa, basado en las recomendaciones de (Robles, 2017). Así mismo, se detallan las características del molino de bolas en la tabla 7.

Figura 12

Molino de bolas



Tabla 7

Características del molino de bolas

Características del molino de bolas	Dimensiones
Diámetro (D)	48.5 cm
Largo (L)	53.2 cm
Numero de oscilaciones	1720 rpm
Motor	3 HP

Fuente: Recopilación de información del equipo de molino de bolas

- **Cálculo del porcentaje de llenado en el molino**

El cálculo del porcentaje de llenado en el molino de bolas se realizó siguiendo las recomendaciones de (Gupta & Yan, 2016), quienes sugieren que la carga no debe exceder el 45% del volumen total del molino. Para determinar este porcentaje de llenado, se utiliza la siguiente ecuación de (Bond, 1961):

$$\% \text{ carga} = 113 - \left(63 * \left(\frac{H_c}{R} \right) \right)$$

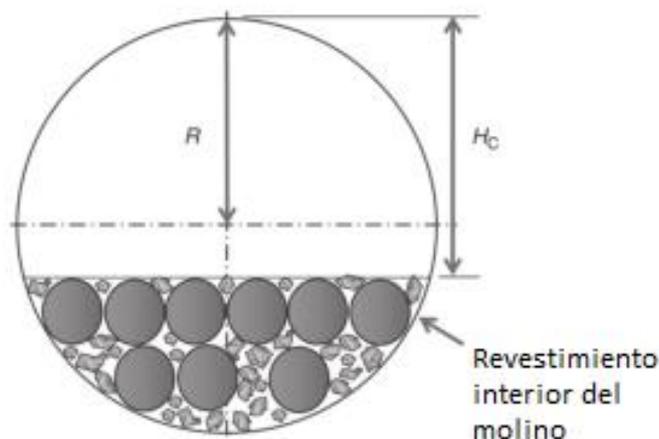
Donde:

- H_c : Altura de carga vertical desde el nivel de las bolas hasta el revestimiento interior en el centro del molino.
- R : es el radio interior del molino

Para obtener la altura de carga H_c , se realiza la medición en el molino de bolas en reposo, el cual estaba cargado con 18.8 Kg de mineral triturado y bolas de molienda, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Altura de H_c de la carga



Reemplazando en la fórmula los datos:



Donde:

- Hc: 0.30 m
- R: 0.2425 m

$$\% \text{ carga} = 113 - \left(63 * \left(\frac{H_c}{R} \right) \right)$$

$$\% \text{ carga} = 113 - \left(63 * \left(\frac{0.30}{(0.2425)} \right) \right)$$

$$\% \text{ carga} = 35 \%$$

Además, en la tabla 8 se muestra la distribución de las bolas para un porcentaje de llenado del 35% del molino.

Tabla 8

Distribución de las bolas

Diámetro de las bolas (cm)	Nº de bolas (Unidad)	Masa total de las bolas (Kg)	% de la masa total
3.2	9	1.35	2
4	77	21.20	29
6.6	42	50.05	69
Total	128	72.60	100

Fuente: Recopilación de información del Equipo del Molino de Bolas.

- **Calculo de volumen del molino**

El cálculo del volumen del molino se basa en la geometría euclidiana y se ha utilizado ampliamente a lo largo de la historia de las matemáticas y la ingeniería. La fórmula para calcular el volumen es:



$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * L$$

Donde:

d: diámetro del molino de bolas= 48.5cm

L: longitud del molino de bolas= 53.2cm

Remplazamos:

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * L$$

$$V = \pi * \left(\frac{48.5 \text{ cm}}{2}\right)^2 * 53.2 \text{ cm}$$

$$V = 98285 \text{ cm}^3$$

- **Procedimiento para la molienda del mineral**

El trabajo experimental se realizó utilizando un molino de bolas con dimensiones de 48.5 cm de diámetro y 53.2 cm de largo, lo que resulta un volumen de 98285 cm³. El molino se llenó con 72.60 Kg de bolas de acero de tres tamaños diferentes (3.2 cm, 4 cm y 6.6 cm) y se agregó una carga de 18.8 Kg del mineral triturado de lo que representan un porcentaje de llenado del 35%.

Se procedió a moler el mineral en el molino de bolas durante un periodo de tiempo de 28 minutos. Tras la etapa de molienda del mineral, se descargaron 18.5 Kg de mineral pulverizado del molino de bolas.

Posteriormente, el mineral pulverizado se sometió al tamizado en seco utilizando un equipo ROTAP (ver anexo 1) junto con una serie de tamices ASTM:



#100 y # 140, con abertura de 150 μm y 105 μm , respectivamente. Los tamices se dispusieron en orden ascendente de menor a mayor # de malla.

La etapa de tamizado se realizó durante 20 minutos, comenzando con una cantidad inicial de 700g de mineral pulverizado, esta etapa se realizó de manera continua hasta alcanzar un total de 18.5 Kg de mineral pulverizado tamizado.

Una vez completado el tamizado, se procedió a pesar el mineral retenido en la malla de +105 μm , obteniendo un peso de 15 Kg. En esta etapa, se realizó el homogenizado y cuarteos sucesivos hasta obtener una muestra del mineral para su respectivo análisis mineralógico y análisis químico por una cantidad de 250 gramos según a los requerimientos de los laboratorios y la contra muestra se almaceno con un peso de 254 gramos.

d. Etapa de deslamado

A continuación, se llevó a cabo una etapa de deslamado utilizando 14.5 Kg del mineral tamizado, con el fin de eliminar las partículas finas menores a <36 μm . Esta etapa se realizó principalmente debido al alto consumo de reactivos durante la flotación causado por la presencia de partículas finas y reduce la eficiencia de la flotación.

El deslamado se realizó mediante el método de decantación, utilizando un tamiz con una abertura de 36 micrómetros, siguiendo el procedimiento descrito en trabajos anteriores (Wills, 2016; Vieceli et al., 2016; Sousa et al., 2018; Filippov et al., 2022).

Una vez culminada la etapa del deslamado, la muestra se sometió al secado. Durante esta etapa, se registró una pérdida de 2Kg de partículas finas con

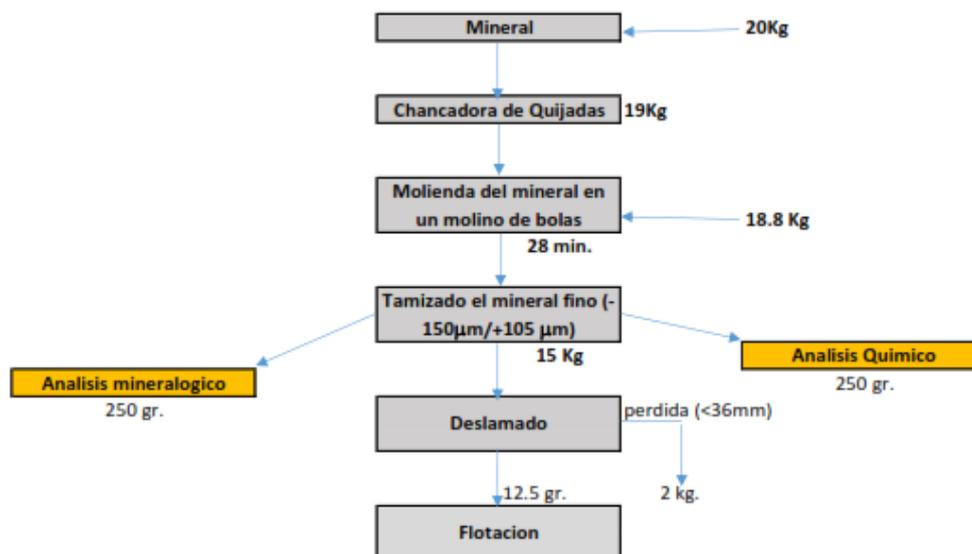
un tamaño inferior a $36 \mu\text{m}$, lo que represento el 13.8 % del peso inicial de la muestra, que era de 14.5 Kg y la cantidad de muestra retenida en la malla de $36 \mu\text{m}$ se registró una cantidad de 12.5 Kg. Este procedimiento se realizó con la finalidad de obtener una alimentación adecuada para el proceso de flotación por espuma, con una granulometría menor a $500 \mu\text{m}$ (Mular & Bhappu, 1980 citado por Vieceli et al., 2016, p. 733).

El cuarteador de Jones y las tamizadoras ASTM se limpiaron con una compresora para mantener la contaminación al mínimo cada vez que se realizó el cuarteo y el tamizado del mineral.

Así mismo, en la figura 14 se observa el diagrama de flujo de la preparación mecánica del mineral.

Figura 14

Diagrama de flujo de la preparación mecánica del mineral





- **Cuarteo de Jones**

El cuarteo de Jones consiste en dividir la muestra de minerales en proporciones más pequeñas y representativas para su análisis posterior. Primeramente, se realiza el homogenizado del mineral y se le adiciona al cuarteador de Jones las muestras mineralógicas, asegurándose de distribuirla uniformemente. Luego, se selecciona una mitad y se repite el mismo proceso de división, dividiendo nuevamente en dos partes aproximadamente iguales. Este proceso se repite hasta obtener la cantidad deseada de la muestra y se rotula la muestra para su análisis posterior. Cada vez que se divide la muestra, esta se va reduciendo gradualmente su volumen.

3.3.2. Análisis de ley y su composición mineralógica de tobas volcánicas

Siguiendo las referencias (Vieceli et al., 2016; Sousa et al., 2018; Liu et al., 2020; Filippov et al., 2022), se realizó el análisis de la ley del mineral y su composición mineralógica. Este análisis se llevó a cabo en el laboratorio Analíticos del Sur (LAS) mediante el método de ensayo para litio por digestión multiácida (10-10000) ppm – ICP – OES y en el laboratorio de la facultad de ingeniería de minas de la Universidad Nacional del Altiplano mediante el método de ensayo para litio por digestión multiácida 4210 MP-AES. Además, se emplearon las técnicas de Difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (XRF) para el análisis mineralógico y análisis químico en el laboratorio de Lima Bizalab.



3.3.3. Determinación de los parámetros óptimos de flotación (pH de la pulpa, dosificación del colector y tiempo de flotación)

a. Ajuste de pH en la pulpa

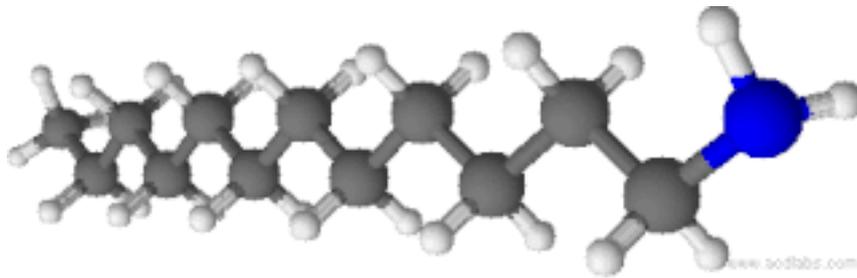
El pH en la flotación, es la variable de control clave en el proceso, siendo esencial para la recuperación y selectividad. Se empleó la solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 10% y solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5% para ajustar el pH del proceso de flotación. Las soluciones se prepararon utilizando agua destilada.

b. Preparación de reactivos de flotación

El colector catiónico dodecilamina (DA) proveída de la empresa Merck Peruana S.A. (EE. UU.). Se prepararon dos concentraciones del colector catiónico (DA) a 0.000015 M y 0.000035 M, utilizando ácido clorhídrico de 10^{-3} M, siguiendo las recomendaciones de (Chisha, 1983). La estructura del colector dodecylamina se muestra en la Figura 15. Por otro lado, el isobutilmetilcarbinol (MIBC) (98%) fue adquirido de la empresa sigma Aldrich, según la referencia (Chaves et al., 2010 citado por Viecele et al., 2016, Pág. 733). Este espumador ayuda a mejorar la selectividad en el proceso de flotación. Además, al ser un alcohol, tiende a formar una película sobre las burbujas, lo que disminuye el transporte de agua en la espuma y reduce el arrastre de limo (partículas ultrafinas).

Figura 15

Estructura de la dodecilmina



Fuente: merck, 2023 (de color azul es el nitrógeno, de color plomo es el carbono y el de color blanco es el hidrógeno).

c. Control del tiempo

Se utilizó un cronómetro para controlar el tiempo en varias etapas del proceso: la etapa de acondicionamiento (10 min), en la etapa de flotación (5 min y 9 min), en la etapa de molienda del mineral (28 min) y en la etapa del tamizado (20 min).

3.3.4. Pruebas de flotación

a. Condiciones del proceso

- Se estableció las condiciones de prueba para la flotación del mineral, teniendo en cuenta su composición mineralógica.
- Las pruebas se realizaron en un equipo de flotación de laboratorio (visión 130 TM) con una celda de 2 litros de capacidad, provisto con un impulsor para inyectar aire en la pulpa. Así mismo, manteniendo la velocidad de rotación del equipo a 1200 rpm y el caudal de aire a 0.5 L/s.
- El tiempo de acondicionamiento se fijó en 10 minutos para la mezcla del mineral, agua y reactivos, siguiendo las recomendaciones de (Vieceli et al., 2016).



- Durante las pruebas de acondicionamiento, la densidad de la pulpa se mantuvo a 60% en peso sólido lo que se considera un valor adecuado según (Vieceli et al., 2016 citado por Bulatovic, 2015).

$$\% \text{ sólido} = \left(\frac{\text{Peso del mineral}}{\text{peso del mineral} + \text{peso del agua}} \right) * 100\%$$

- El pH de la pulpa se consideró en base a las recomendaciones de (Chisha, 1983), cuyos valores de pH fueron de 6 y 10.
- Se utilizó el colector dodecilamina para la flotación de litio en medio alcalino con concentraciones de 0.000035 M y 0.000015 M.
- Los concentrados se recolectaron en diferentes tiempos de flotación en 5 min y 9 min.

b. Procedimientos

- **Pesaje del mineral:** En cada prueba se pesó una cantidad de 1000 gramos de mineral.
- **Adición de mineral y agua:** se agregó el mineral pesado a la celda de flotación junto con 667 mL de agua.
- **Agitación y medición del pH:** se agitó la mezcla y se midió el pH de la pulpa, registrando el valor obtenido.
- **Ajuste del pH en la pulpa:** el pH de la pulpa se ajustó a un valor específico mediante la adición de reactivos como el ácido sulfúrico (H₂SO₄) o el hidróxido de sodio (NaOH) (ver anexo 3).
- **Adición de colectores:** se agregaron los colectores de flotación a la pulpa utilizando una micropipeta, registrando la cantidad exacta adicionada (ver anexo 4).



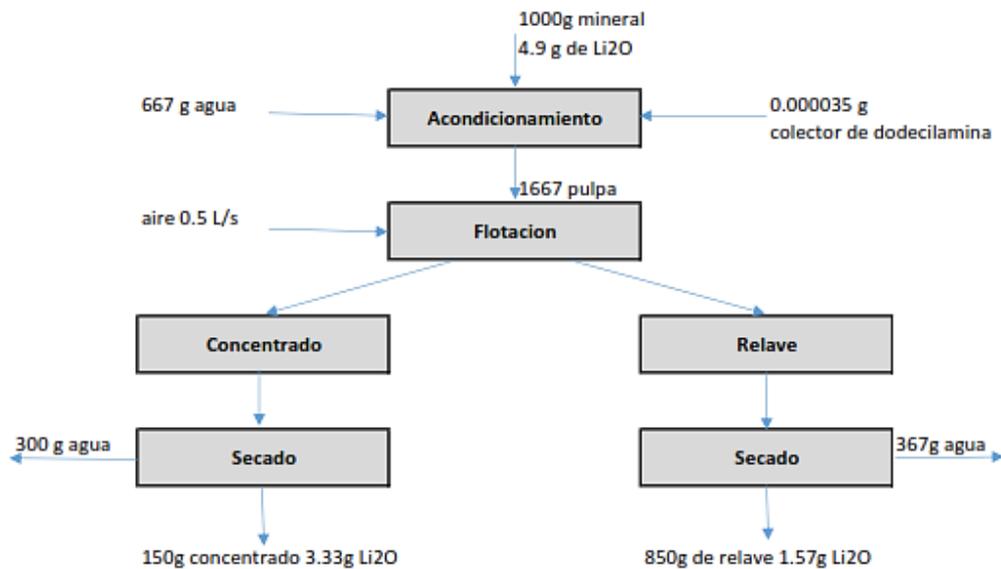
- **Acondicionamiento:** la pulpa fue acondicionada durante un periodo de tiempo de 10 minutos para permitir la interacción entre los reactivos y las partículas mineralógicas.
- **Inyección de aire y recolección de concentrados:** se inyectó aire en la celda de flotación para inducir la formación de burbujas, registrando los tiempos en los que se recolectaron las burbujas (concentrados).
- **Se observó visual:** se observa visualmente la presencia de mineral flotado en forma de burbujas estables.
- **Filtrado y secado de concentrados:** los concentrados recolectados se filtraron utilizando el papel Whatman # 125 mm y se secaron en una estufa a 80°C durante 24 horas (ver anexo 6).
- **Análisis de contenido de litio:** los concentrados secos se enviaron a un laboratorio para determinar su contenido de litio utilizando un equipo espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (MP-AES).

Cuyos resultados se muestran se muestran en el anexo 12.

La figura 16 se muestra el diagrama de flujo de balance de masa realizado en esta investigación.

Figura 16

Diagrama de flujo de balance de masa



3.3.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico de las variables del proceso de flotación se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software STATGRAPHICS.

3.3.6. Diseño factorial 2^k

Se procedió aplicar un diseño factorial de 2^k para investigar el efecto de tres variables de control son: el pH, la concentración de la dodecilamina y el tiempo de flotación (ver tabla 9). En este estudio, se realizaron ocho pruebas diferentes correspondientes a 2^3 , además de cuatro pruebas centrales, obteniendo de un total de 12 pruebas de flotación. Durante estas pruebas, se consideraron los niveles mínimos y máximos de las variables, como se muestra en la tabla 10.



Tabla 9

Variable de control

Factores	Bajo (-)	Alto (+)
pH	6	10
Concentración dodecylamina (M)	0.000015	0.000035
Tiempo de flotación (min)	5	9



Tabla 10

Diseño experimental de 2^3 , con 4 replicas centrales

N°	X1	X2	X3	pH	Concentración (M)	Tiempo (min)
1	-	-	-	6	0.000015	5
2	+	-	-	10	0.000015	5
3	-	+	-	6	0.000035	5
4	+	+	-	10	0.000035	5
5	-	-	+	6	0.000015	9
6	+	-	+	10	0.000015	9
7	-	+	+	6	0.000035	9
8	+	+	+	10	0.000035	9
9	0	0	0	8	0.000025	7
10	0	0	0	8	0.000025	7
11	0	0	0	8	0.000025	7
12	0	0	0	8	0.000025	7
Factores				Bajo (-)	Alto (+)	



3.3.7. Variables

a. Variable dependiente

Porcentaje de óxido de litio (%Li₂O)

b. Variables independientes

pH

Concentración de la dodecilamina (M)

Tiempo de flotación (minutos)



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANALIZAR LA LEY Y SU COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE TOBAS VOLCÁNICAS

4.1.1. Análisis de ley

El análisis de ley se llevó a cabo en el rango de tamaño de partículas entre la malla pasante -150 μm y en la malla retenida +105 μm , con un contenido de 2249 ppm, equivalente a una ley de óxido de litio del 0.49% Li_2O . La determinación de la ley del litio se realizó mediante el equipo de ICP-OES como parte de los análisis realizados en el laboratorio, cuyo resultado se muestran en la tabla 11 y en el anexo 8.

Tabla 11

Ley del mineral de cabeza

N°	# Malla	Abertura/ μm	Contenido de Li (ppm)	% Li_2O
1	-100/ +140	-150 /+ 105	2294	0.49

Fuente: Laboratorio Analíticos del Sur (LAS).

Este resultado en una granulometría intermedia indica una relación significativa entre el tamaño de partícula y la concentración de litio en nuestra muestra mineralógica. Según Vieceli et al. (2016), se observa un mayor contenido de litio en las fracciones de tamaño intermedio, entre la malla pasante de -125 μm y la malla retenida +90 μm , con una ley de 1.53% Li_2O . Por otro lado, Liu (2020)



realizo el estudio de fraccionamiento de las mallas y encontró que la mayor ley de litio se encontraba en la malla retenida +250 μm , con una ley de 1.71% Li_2O . Estos resultados están respaldados por Wills (2016), quien sugiere que el proceso de flotación debería llevarse a cabo en un rango de tamaño intermedio debido a la alta ley del mineral a flotar. Por su parte, Demeausy et al. (2023) indica que las fracciones de tamaño intermedio tienden a presentar un contenido de litio más elevado debido a la estructura laminar de las micas, donde se encuentra el litio. Además, según Filippov et al. (2022), Encontró que el contenido de Li_2O en la muestra de alimentación de mayor ley de 2.35% de Li_2O en partículas de +2mm en el tamaño intermedio y a medida que el tamaño de las partículas disminuía el contenido de ley también disminuía siendo el más bajo de 0.97% de Li_2O en la malla pasante -0.063mm. La baja ley de litio en la fracción fina se atribuye a la liberación de partículas finas de impurezas. Por lo tanto, estos resultados enfatizan la importancia de realizar el proceso de flotación en granulometrías intermedias para lograr una concentración óptima de óxido de litio.

4.1.2. Composición mineralógica

Los resultados de la composición mineralógica, presentados en la tabla 12, fueron obtenidos utilizando un límite de detección del 1% mediante el equipo de difracción, que representa la sensibilidad mínima de los difractogramas para detectar los componentes en la muestra. Es importante tener en cuenta que debido a este límite de detección de los difractogramas, las concentraciones inferiores al 1% podrían no haber sido detectados con precisión. Según los análisis realizados por difracción de rayos X (DRX), se determinó en los difractogramas que la muestra contiene los siguientes minerales principales: cuarzo, plagioclasa (albita), feldespato – Na (sanidina), mica (moscovita) y Caolinita. El cuarzo representa el

mayor porcentaje, con un 35%, seguido de la plagioclasa (albita) con un 30%. Los feldespatos – Na (sanidina) constituyen el 19% de la muestra, mientras que la mica (moscovita) y la caolinita representan el 9% y el 5%, respectivamente (ver anexo 10 y 11). Estos resultados brindan una comprensión detallada de la composición mineralógica de la muestra, lo que resulta fundamental para tener en conocimiento la especie mineralógica para el proceso de flotación.

Tabla 12

Composición mineralógica del mineral de tobas volcánicas

Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	35
Plagioclasa (albita)	(Na,Ca)(Al,Si) ₄ O ₈	30
Feldespatos – Na (Sanidina)	(K,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	19
Mica (Moscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	9
caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5

Fuente: Laboratorio de análisis BIZALAB.

En relación con los resultados de la composición mineralógica, obtenidos a través del análisis por difracción de rayos X, la presencia significativa de cuarzo, plagioclasa (albita) y feldespatos (sanidina) tiene una composición rica en sílice y potasio, características comunes de las rocas ígneas, por lo que son de origen volcánico para las tobas analizadas. Además, se identificó la presencia de mica (moscovita) y caolinita, lo que indica posibles alteraciones hidrotermales en la



formación de estas tobas. Estos resultados son consistentes con la naturaleza volcánica de las tobas y su formación en entornos geológicos asociados con procesos magmáticos evolucionados, con la fusión de la actividad volcánica. La clasificación mineralógica de las tobas volcánicas se apoya en estudios previos realizados por autores como Fisher y Schmincke (1984) en su obra “Pyroclastic Rocks” quienes profundizan en las características de las rocas piroclásticas, las tobas volcánicas suelen estar compuestas por una variedad de minerales, siendo los más comunes el cuarzo, las plagioclasas, los feldespatos y las micas, este conjunto de componentes caracteriza a las rocas ígneas de origen explosivo, formadas a partir de cenizas volcánicas expulsadas durante las erupciones volcánicas, además el estudio de IUREP (1984) que indico que los minerales de uranio estaban alojadas en rocas volcánicas acidas de composición riolítica que cubren grandes áreas de la meseta de Macusani en formaciones estratificadas horizontalmente desde la superficie hasta una profundidad de aproximadamente 100 m.

Estudios previos como los de Viecey et al. (2016), Bulatovic (2015), Choi et al. (2012), Garrett (2004), Filippov et al. (2022) y Sousa et al. (2018), demuestran que los minerales de litio están incrustados junto con minerales de cuarzo, albita, moscovita y feldespato siempre están asociados con este tipo de minerales. Por lo tanto, el mineral que se caracterizó se encuentra dentro de los rangos de los compuestos que lo acompañan al litio. Además, el informe técnico de evaluación económica preliminar del proyecto de litio Falchani (2020) elaborado por DRA PACIFIC, proporciona detalles sobre esta roca volcánica encontradas en la región, identificadas como rocas volcánicas acidas con una composición de riolita. La riolita, son rocas volcánicas acidas, contiene alta



concentración de sílice y está compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasa y feldespato, complementan los resultados de nuestro análisis mineralógico y respaldan la comprensión de las características geológicas de las muestras. Además, el pH registrado de 5.65 confirma la naturaleza acida de las tobas volcánicas en la región.

4.1.3. Composición química de la muestra

Los resultados de la composición química de la muestra mineralógica se presentan en la tabla 13, obtenidos mediante el equipo de fluorescencia de rayos X (FRX). Se realizó una determinación semicuantitativa de los elementos desde el sodio (Z=11) hasta el uranio (Z=92) utilizando el método de preparación de pastilla prensada. Destacan los siguientes elementos: el silicio (Si) con un 31.74%, el aluminio (Al) con un 10.06%, el potasio (K) con un 3.48%, el sodio (Na) con un 2.62%, el hierro (Fe) con un 0.34%, el fósforo (P) 0.19%, el rubidio (Rb) con un 0.18%, entre otros (ver anexo 9). En este tipo de estudio, utiliza el método de pastilla prensada como parte de su procedimiento estándar para la preparación de la muestra antes de realizar el análisis químico. El método de pastilla prensada implica la compactación de la muestra en forma de pastilla sólida con una presión definida, esta técnica es ampliamente aceptada para este tipo de estudio, se utiliza para garantizar la uniformidad y estabilidad de la muestra durante el análisis.

Tabla 13

Análisis químico semicuantitativo de la muestra (fracción en masa, %)

Si	Al	K	Na	Fe	P	Rb	Mn	Ca	Y	Sn	Zn
31.74	10.06	3.48	2.62	0.34	0.19	0.18	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01

Fuente: Laboratorio de análisis BIZALAB.



Según a los resultados de la composición química de nuestra muestra presentan similitudes con investigaciones previas sobre la asociación de minerales de litio, según Wietelmann y Bauer (2003) la lepidolita se asocia principalmente con el rubidio y es una fuente mineral de rubidio. Por lo tanto, los resultados de nuestra muestra como mica podrían respaldar la presencia de lepidolita en la composición mineralógica. Por otro lado, en el informe técnico de evaluación económica preliminar del proyecto de litio Falchani (2020) elaborado por DRA PACIFIC, señala que la composición química de las muestras contiene consiste en aluminosilicatos y silicato de potasio, lo cual coincide con la composición química esperada de nuestra muestra de toba volcánica. Además, según los análisis por Quille (2022), identifico por análisis por activación neurótica que hay 25 elemento de impurezas en su muestra, siendo el aluminio, el sodio y el potasio los más prevalentes, entre otros elementos, también realizo los análisis por métodos espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) detectaron a los 8 elementos adicionales que no se identificaron en los análisis anteriores como el bario (Ba), cadmio (Cd), Cobre(Cu), azufre (S), plomo (Pb), molibdeno (Mo), bismuto (Bi) y plata (Ag). Así mismo, Zapana (2020) realizo el análisis químico con el equipo ICP-OES/MS para determinar los elementos de impurezas del mineral, reportando un alto porcentaje de elementos como el aluminio (Al), potasio (K), sodio (Na) y entre otros elementos.

Por lo tanto, nuestros análisis realizados en el equipo de fluorescencia de rayos X, podemos confirmar la presencia de estos mismos elementos en el análisis químico en la muestra estudiada.



Es importante indicar mediante la técnica para la caracterización del mineral que contiene litio se indujo DRX, FRX, no se pudo detectar el litio, debido a que este metal no emite energía suficiente para ser detectados. Sin embargo, cuando inducimos los análisis de plasma acoplado inductivamente a espectroscopia de emisión atómica (ICP – AES) por lo que se determinó la ley en ppm de Li. Lo que significa que el contenido de litio debe medirse utilizando herramientas de detección directa como espectroscopia de adsorción atómica (AAS) e ICP u otras herramientas espectrometrías no destructivas como la espectroscopia de descomposición inducida por láser (LIBS) (Sweetapple & Tassios, 2015). Según Demeusy et al. (2023) indica que el litio es un elemento muy ligero, lo que hace que la detección cuantitativa mediante técnicas no destructivas, normalmente, se someten a equipos de difracción de rayos X (DRX), espectrómetros de dispersión de electrones (EDS), espectrómetros de dispersión de longitud de onda detectores (WDS), fluorescencia de rayos X (FRX), microscopia electrónica de barrido (SEM), microanálisis con sonda electrónica (EPMA), los sistemas de mineralogía automatizada como el análisis de liberación de minerales (MLA) y evaluación cuantitativa de materiales mediante microscopia electrónica de barrido (QEMSCAN) no se pueden utilizar para detectar al litio.



4.2. DETERMINAR LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE FLOTACIÓN (pH DE LA PULPA, DOSIFICACIÓN DEL COLECTOR Y TIEMPO DE FLOTACIÓN)

4.2.1. Modelo de regresión de las 12 pruebas experimentales

Se llevaron a cabo 12 pruebas de flotación, utilizando un diseño factorial 2^3 con tres parámetros principales: pH, concentración de la dodecilamina (DA) y el tiempo de flotación. Cada experimento se realizó en duplicado, con el punto central ensayado cuatro veces. Los resultados se presentan en la Tabla 14. Estos resultados indican una variación en el % de óxido de litio en función de los diferentes niveles de pH, concentración de la dodecilamina y los tiempos utilizados en las pruebas de flotación. Las condiciones que resultaron en la mayor concentración de óxido de litio fueron un pH de 10, una concentración de la dodecilamina de 0.000035 M y un tiempo de flotación de 9 minutos, fueron las condiciones ideales para maximizar la concentración de Li_2O en el concentrado final. Bajo estas condiciones optimizadas, se logró mejorar significativamente la concentración de litio en el mineral de litio, aumentando del 0.49% al 2.22% de Li_2O mediante el proceso de flotación por espuma. Además, en el Anexo 12 se incluyen los resultados mediante la digestión multiácida 4210 MP-AES para la determinación de los concentrados de litio (Li) en ppm.

- Cálculo del porcentaje de óxido de litio de ppm de litio (Li) a % de óxido de litio (Li_2O)

$$\% \text{Li} = 8176 \frac{\text{mg}}{\text{Kg}} * \frac{1\text{Kg}}{1000\text{g}} * \frac{10^{-3}\text{g}}{1\text{mg}} = 0.8176 \frac{\text{g}}{100\text{g}} = 0.8176\% \text{Li}$$



$$\% Li_2O = \frac{29.88 \text{ g } Li_2O}{2 * (6.94 \text{ g } Li)} * 0.8176\% Li = 1.76\% Li_2O$$

Se demuestra el resultado de 1.76% Li₂O obtenido en la primera prueba experimental y se van realizando los calculos respectivos para cada prueba.

Tabla 14

Diseño experimental de las pruebas de flotación y resultados obtenidos

N°	X1	X2	X3	pH	Concentración (M)	Tiempo (min)	% óxido litio
1	-	-	-	6	0.000015	5	1.76
2	+	-	-	10	0.000015	5	1.78
3	-	+	-	6	0.000035	5	1.81
4	+	+	-	10	0.000035	5	1.90
5	-	-	+	6	0.000015	9	1.82
6	+	-	+	10	0.000015	9	1.94
7	-	+	+	6	0.000035	9	1.98
8	+	+	+	10	0.000035	9	2.22
9	0	0	0	8	0.000025	7	1.84
10	0	0	0	8	0.000025	7	1.85
11	0	0	0	8	0.000025	7	1.82
12	0	0	0	8	0.000025	7	1.80



Comparativamente, con un diseño estadístico similar empleando en un estudio anterior (Vieceli et al. 2016), donde se obtuvo un porcentaje máximo de contenido de litio (Li) de 2.07%, nuestros resultados mostraron un contenido de óxido de litio (Li_2O) de 2.22%.

Estos resultados se alinean con investigaciones previas de Filippov y sus colaboradores respaldan la eficiencia de la flotación por espuma, especialmente en fracciones de tamaño intermedio (-210/+63 μm), obteniendo concentrados con altos contenidos de 3.5% de Li_2O . Además, se observó que la aplicación de un proceso de deslamado previo a la flotación, como lo indican (Sousa et al., 2018), permitió mejorar la eficiencia del proceso al eliminar las partículas finas que podrían reducir la recuperación de litio y aumentar el consumo de reactivos.

Filippov et al. (2023) optimizaron la flotación por espuma en 300 segundos, en un pH 3.5 y utilizando 150 g/ton de monoeteramina como colector, logrando una recuperación del 77.1% de Li_2O y un concentrado de 4% de Li_2O a partir de una alimentación de 1.80 de Li_2O , lo que corresponde a una mejora de 2.2 veces. Por otro lado, Sousa et al. (2018) optimizaron la flotación de la lepidolita a un pH de 3.5 y utilizando 600g/ton del colector AERO 3030C, logrando mejorar la recuperación del Li_2O del 1.20% al 4.7%, lo que corresponde a una mejora de 3.5 veces.

Adicionalmente, los resultados obtenidos en estudios de Liu et al. (2020) Demostraron que la flotación por espuma en una alimentación con una ley de 1.2 % Li_2O logro concentrar hasta un 4.7 % de Li_2O utilizando una dosis de DDA de 6×10^{-6} M, en un pH =10.3, ha demostrado que la DDA alcanza la máxima



hidrofobicidad en un rango de pH 8 y 10 y en una concentración mínima se requiere del colector para inducir la hidrofobicidad de la lepidolita de Yichun. Además, Bulatovic (2015) destaca la importancia de ajustar los parámetros de flotación según las características específicas del mineral y el proceso de separación de los minerales de litio (Li) la lepidolita flotan en un amplio rango de valores de pH, generalmente entre 2.5 y 10.

Por lo tanto, nuestros resultados de concentración de Oxido de litio se encuentran en líneas con las investigaciones previas, respaldando la eficiencia de las condiciones óptimas identificadas en nuestro estudio.

4.2.2. Análisis de varianza para la recuperación

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA), se muestra en la tabla 15, la cual indica la significancia estadística para cada factor al comparar su cuadrado medio con una estimación del error experimental. En este caso, se observa tres factores muestran un valor-P menor que 0.05, lo que indica que son significativamente distintos de cero con un nivel de confianza del 95.0%. Además, el valor del cuadro estadístico R-Cuadrada señala que el modelo ajustado explica el 90.6834% de la variabilidad en la recuperación de óxido de litio.

El cuadro estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, muestra un valor del 79.5034%. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0.0570818. El error medio absoluto (MAE) de 0.0327778 representa el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) evalúa los residuos para determinar si existe alguna correlación significativa basada en el orden de los datos en el archivo. Dado que el valor-P es

mayor que 5.0%, no hay indicios de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Los resultados del análisis de varianza reflejan una alta significancia estadística para los factores: pH, concentración de colector dodecilamina y el tiempo de flotación, con porcentajes de 96.66%, 98.71% y 99.30%, respectivamente. Estos resultados respaldan la eficacia de nuestro modelo en explicar la variabilidad en la recuperación de óxido de litio.

Tabla 15

Análisis de varianza (ANOVA)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	0.0276125	1	0.0276125	8.47	0.0334
B:Concentración dodecylamina	0.0465125	1	0.0465125	14.27	0.0129
C:Tiempo de flotación	0.0630125	1	0.0630125	19.34	0.0070
AB	0.0045125	1	0.0045125	1.38	0.2922
AC	0.0078125	1	0.0078125	2.40	0.1822
BC	0.0091125	1	0.0091125	2.80	0.1553
Error total	0.0162917	5	0.00325833		
Total (corr.)	0.174867	11			

Fuente: Resultados de ANOVA en programa estadístico STATGRAPHICS



R-cuadrada= 90.6834 por ciento.

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 79.5034 por ciento.

Error estándar del est. = 0.0570818.

Error absoluto medio = 0.0327778.

Estadístico Durbin-Watson = 1.5633 (P=0.1593).

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.147911.

Al comparar nuestros resultados obtenidos con el modelo de regresión de primer orden para la recuperación del Li_2O con el trabajo de Vieceli et al. (2016) emplearon un modelo de regresión de segundo orden en su análisis de varianza para la recuperación de litio, demostrando que se ajustaba de manera óptima sus datos. Aunque el valor obtenido en la prueba de curvatura cuadrática se acercó al nivel de significancia ($p=0.070$), los resultados no indicaron una falta de ajuste del modelo, lo que confirmó la validez del modelo ajustado. Además, evaluaron los modelos mediante el coeficiente de determinación R^2 , obteniendo valores de 0.96 para la recuperación de litio y 0.95 para el contenido de litio, lo que representa el 96% y el 95% de la variabilidad de las respuestas, respectivamente. Además, nuestros resultados del valor del cuadro estadístico R-Cuadrada señala que el modelo ajustado explica 90.6834% de la variabilidad en la recuperación de óxido de litio.

Por lo tanto, nuestros resultados respaldan nuestra metodología y los factores pH, concentración de colector dodecilamina y tiempo de flotación desempeñan un papel fundamental en la optimización del proceso de recuperación de óxido de litio.

4.2.3. Coeficiente de regresión para el porcentaje de recuperación

El modelo matemático describe el proceso de flotación, en donde expresa el % de Li_2O en función de las variables de pH, concentración de la dodecilamina (DA) y el tiempo de flotación.

Tabla 16

Coeficiente de regresión para porcentaje de óxido de litio

Coeficiente	Estimado
constante	2.11073
A:pH	-0.055
B:Concentración dodecilamina	-13687.5
C:Tiempo de flotación	-0.0603125
AB	1187.5
AC	0.0078125
BC	1687.5

Se muestra la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo matemático ajustado es:

% de óxido de litio = $2.11073 - 0.055 \cdot \text{pH} - 13687.5 \cdot \text{Concentración dodecilamina} - 0.0603125 \cdot \text{Tiempo de flotación} + 1187.5 \cdot \text{pH} \cdot \text{Concentración}$



dodecylamina + $0.0078125 \cdot \text{pH} \cdot \text{Tiempo de flotación} + 1687.5 \cdot \text{Concentración dodecylamina} \cdot \text{Tiempo de flotación}$.

Esta ecuación ha permitido calcular el valor óptimo de extracción del óxido de litio (67, 96% Li_2O).

En comparación con el estudio de Huang et al. (2021), quienes lograron una recuperación del 55% de Li_2O utilizando una concentración de $2 \times 10^{-4} \text{M}$ del colector de dodecilamina, nuestros resultados muestran una recuperación significativamente mayor del 67.96% Li_2O . Esta diferencia indica una mejora sustancial en la eficiencia de extracción en nuestro estudio en comparación con el estudio.

Además, en un estudio de Qian et al. (2021) se ajustó a un pH 12 y se utilizó una concentración de $0.647 \times 10^{-6} \text{M}$ (equivalente a 12 mg/L) de colector DDA en una micro flotación, logrando una recuperación del 90%. Es importante destacar que estas condiciones difieren en nuestro estudio, ya que Qian et al. (2021) utilizaron una muestra artificial. Estas condiciones difieren en nuestro estudio debido a que usaron una muestra artificial. Este estudio demuestra la viabilidad de alcanzar altas concentraciones de recuperación mediante la optimización de los parámetros de flotación y la selección adecuada de la concentración del colector catiónico. Respaldar la eficacia de nuestra metodología y sugiere obtener resultados aún mejores mediante futuras investigaciones.

4.2.4. Optimización del proceso de flotación

La optimización del proceso de flotación se detalla en la tabla 17, muestra la combinación de los niveles de los factores que maximizan el porcentaje de concentrado de óxido de litio. En ella se identifican los valores óptimos de pH,

concentración de colector dodecilamina y tiempo de flotación. El modelo matemático logro optimizar el porcentaje de concentrado de óxido de litio hasta alcanzar el 2,20%. Se pueden fijar uno o más factores a un valor constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

Tabla 17

Valores óptimos de variables independientes

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	6.0	10.0	10.0
Concentración dodecilamina	0.000015	0.000035	0.000035
Tiempo de flotación	5.0	9.0	9.0

Los parámetros óptimos de flotación se determinaron principalmente a través de las pruebas experimentales y análisis. Estos parámetros se seleccionaron considerando el tipo de reactivo para los minerales no sulfurados según a la bibliografía de (Wills, 2016). Las condiciones de pH se optimizaron en función de la recuperación del óxido de litio, mientras que el tamaño granulométrico se consideró según la ley del óxido de litio. El tamaño granulométrico se estableció según a la literatura (Shisha, 1983; Vieceli, 2016; Sousa et al., (2018); Wills, 2016 & Liu, 2020).

De acuerdo (Vieceli et al. 2016), quienes emplearon un enfoque cinético, encontraron tiempos de flotación óptimos entre 9 y 10 minutos para obtener buena selectividad en lepidolita del depósito de Gonçalo (Portugal). Esta información



respalda la validez de nuestros resultados y la efectividad de nuestro enfoque metodológico.

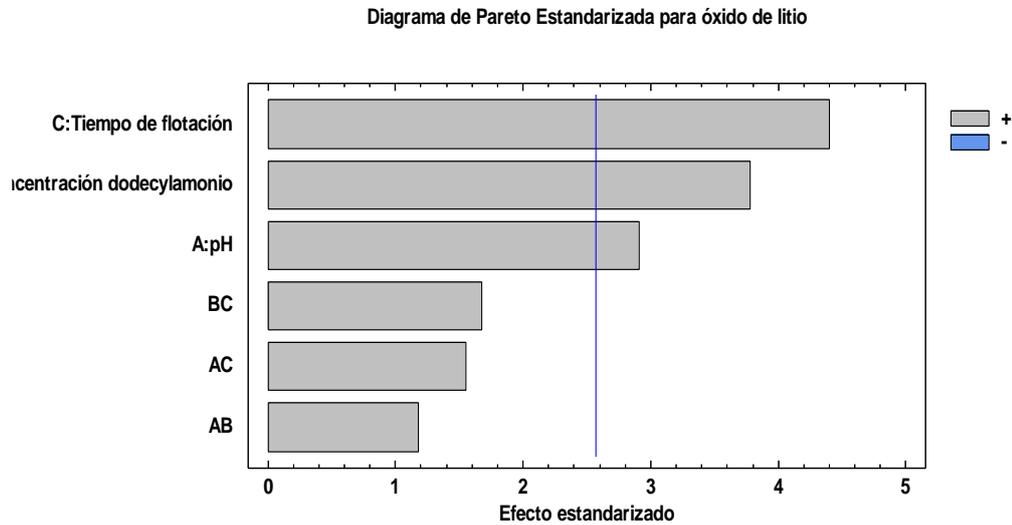
4.2.5. Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto de la figura 17 ordena de manera descendente los valores absolutos de los efectos estandarizados de los factores evaluados en este estudio. Estos valores se representan mediante barras horizontales, organizadas desde el efecto más significativo hasta el menos relevante. El propósito principal es visualizar la estandarización de Li_2O y determinar la insignificancia estadística para cada factor. Además, se incluye una línea de referencia que indica los efectos estadísticamente significativos.

En la figura 17, se muestra los factores de tiempo de flotación, concentración de dodecilamina y pH son estadísticamente significativos. Estos factores tienen un impacto directo en el proceso de flotación del mineral de litio, sin embargo, las interacciones BC, AC y AB no muestran significancia estadística y por lo tanto, no afectan al proceso de concentración del mineral de litio.

Figura 17

Diagrama de Pareto de los valores estandarizados de los tres factores para la recuperación de litio



Vieceli et al. (2016) coinciden con nuestros resultados al identificar la dosificación del colector de flotación como el factor más relevante, seguido del pH. Sus investigaciones demuestran que al aumentar la dosis del colector de flotación y reducir el pH de la pulpa conducen a una mayor recuperación de litio. Este estudio evidencio que la dosificación del colector de flotación, al ser comparada entre los niveles altos y bajo, alcanzo un 88.28% y un 59.24% de recuperación, respectivamente. Además, demostraron que el tiempo de flotación no influye significativamente en las recuperaciones de litio.

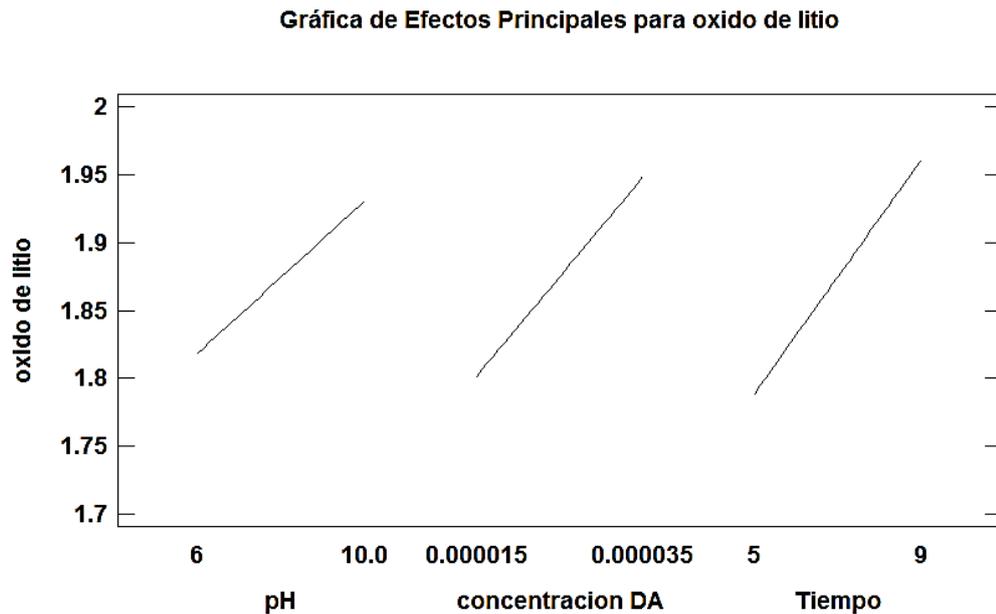
4.2.6. Efectos principales de los factores

En la figura 18 se muestran las líneas correspondientes al pH, la concentración de dodecilamina y el tiempo de flotación en relación al porcentaje de extracción del óxido de litio.

Se observa que las tres rectas tienen pendiente positiva, lo que indica una relación directamente proporcional entre estos factores y el porcentaje de concentrado de óxido de litio.

Figura 18

Efectos principales de los parámetros

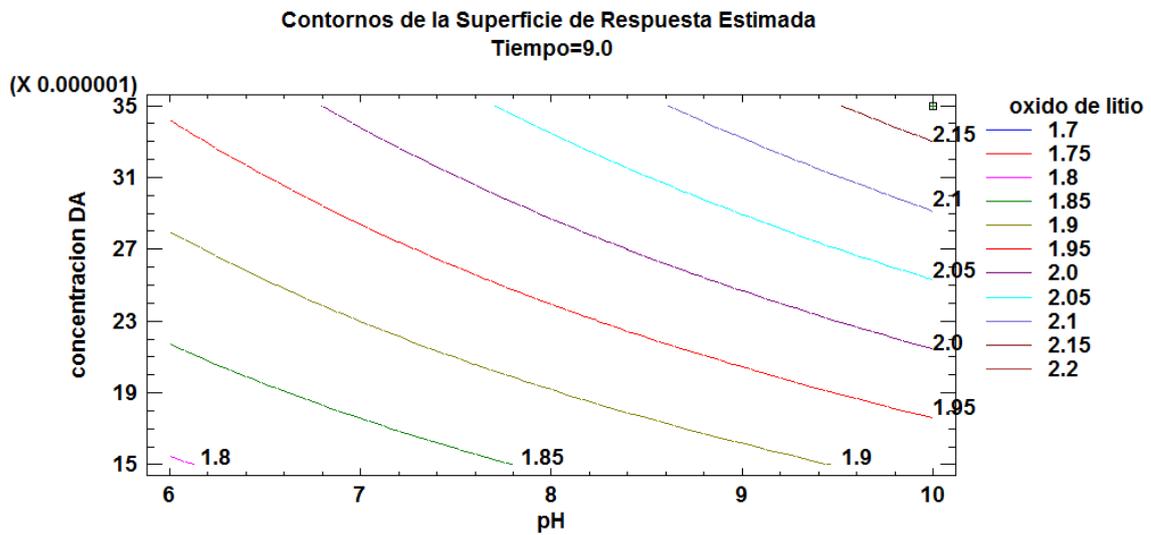


4.2.7. Superficie de respuesta

La figura 19 presenta el gráfico de superficie de respuesta, el cual muestra la estimación para los factores de pH, concentración del colector dodecilamina y un tiempo de 9 minutos. Además, se observa que el porcentaje de concentrado de óxido de litio en el mineral alcanza aproximadamente el 2.20 % de Li_2O . Los gráficos de contorno juegan un papel crucial en el medio de la superficie de respuesta, ya que permite al investigador caracterizar la forma de la superficie y localizar el óptimo con una precisión razonable, como menciona Montgomery (2012).

Figura 19

Superficie de respuesta



Vieceli et al. (2016) reportaron resultados de superficie de respuesta donde se observan las gráficas de contorno correspondientes a los valores de respuesta obtenidos en un tiempo de flotación de 12 minutos, un pH de 2 y una dosificación del colector AERO 3030C inferior a 230 g/ton, lo que resulto un mayor contenido de litio, con el aumento de dosis del colector de flotación y el pH resulta en una reducción de los concentrados de litio. Este fenómeno puede estar asociado con la disminución de la selectividad del colector de flotación en estas condiciones. Además, se indicó que las respuestas obtenidas en este punto maximizan una concentración de litio del 2.09%.



V. CONCLUSIONES

- Se obtuvo un concentrado de 2.22% de Li_2O mediante el proceso de flotación por espuma a partir de una ley de mineral de 0.49% de Li_2O .
- Se caracterizó el mineral de litio por difracción de rayos X, cuya composición mineralógica está conformado por cuarzo, plagioclasa, caolinita, feldespato y mica. Mediante análisis de espectroscopia de emisión atómica se cuantificó la presencia de silicio (31.74%), aluminio (10.06%), potasio (3.48%) y 0.49% de óxido de litio. En análisis granulométrico se determinó que el 80% de partículas pasante son en la malla ASTM -150 μm /+ 105 μm y este resultado es importante para flotación de mineral de litio.
- Se determinaron los parámetros óptimos para el proceso de flotación, siendo el pH 10 ideal de la pulpa, concentración óptima de dodecilamina de 35×10^{-6} M y el tiempo de flotación de 9 minutos.



VI. RECOMENDACIONES

Dentro de las investigaciones a considerar en la realización de futuras investigaciones, se propone:

- Se recomienda realizar estudios de flotación con colectoras catiónicas orgánicas para concentrar el óxido de litio (Li_2O) para que sea amigable con el medio ambiente.
- Se recomienda realizar estudios con la medición del potencial zeta de la pulpa y debe realizarse en el mismo ámbito de trabajo para proporcionar información sobre la química y la transferencia de electrones que se produce en la pulpa.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arfwedson, J. A. (1817). "Análisis de la petalita, una nueva especie mineralógica."
Journal of Chemistry, 14(83), p. 296-299.
- Bond FC. Br Chem Eng. (1961); 6: 543. 378.
- Bulatovic, S. M. (2015). Manual de reactivos de flotación: química, teoría y práctica:
Volumen 3: Flotation of Industrial Minerals. Elsevier Science.
- Buthelezi, N. (2020). An investigation into the flotation response of wollastonite and
silicate gangue minerals. Department of Mining and Materials Engineering,
McGill University, Montreal, Canada. Masters thesis, p. 1-97.
- Chaib, A. (2016) "New condition for separation of orthoclase from quartz by flotation;
case of Ain Barbar quarry (Algeria)," *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet.*
Naukovyi Visnyk, vol. 1, p. 67.
- Chaves, A. P. & L. F. (2010). Tratamiento mineros. Centro de tecnología mineral, p. 1 -
465.
- Chelgani, S.C., Leißner, T., Rudolph, M., Peuker, U.A., 2015. Study of the relationship
between zinnwaldite chemical composition and magnetic susceptibility. *Miner.*
Eng. 72, 27–30.
- Chisha Lombe Wilfred (1983). The Surface chemistry and flotation of spodumene,
lepidolite and associated silicates in the presence of Dodecylamine. Department
of Mineral Resources Engineering. Thesis, p. 1-259.
- Choi, J., Kim, W., Chae, W., Kim, S.B., Kim, H., (2012). Electrostatically controlled
enrichment of lepidolite via flotation. *Mater. Trans.* 53, p. 2191-2194.



- Colton, J.W., (1957). Recovery of lithium from complex silicates. *Advances in Chemistry*, vol. 19, American Chemical Society, p. 3–8.
- Cooper, M., et al., 2004. Impact of air distribution profile on banks in a Zn cleaning circuit. Proceedings of the 36th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors Conference, CIM, Ottawa, ON, Canada, p. 525 - 540.
- Demeusy, B., Arias Quintero, C. A., Butin, G., Laine, J., Sunil Kumar, T., Marin, J., De Haine, Q., & Filippov, L. O. (2023). Estudio de caracterización y liberación del Granito Beauvoir para la recuperación de mica litio. *Minerales*, 13(7), 950
- Fairbanks, E. (1981). Minerales de Ganga. *Enciclopedia de Ciencias de la Tierra*, p.1-49.
- Falchani Lithium Project NI 43-101 Technical Report – Preliminary Economic Assessment (2020), DRA PACIFIC, p. 1-228.
- Fisher, R. V., and Schmincke, H. – U. (1984). “Pyroclastic Rocks.” Springer – Verlag. Pp. 383 – 409.
- Filippov O., Gabriel C., Sousa R. (2022). Separation of lepidolite from hard-rock pegmatite ore via dry processing and flotation. *Université de Lorraine, Science, elsevier*, p. 1-29.
- Fuerstenau, M. C., Jameson, G., y Yoon, R. H. (2007). From flotation: A century of innovation. SME.
- Gaudin, A. M., & Fuerstenau, M. C. (1955). "Interacciones superficiales en la flotación de minerales". *Revista de Química de Superficies*, Vol. 3, pp. 112-125.
- Garrett, D. E. (2004). Handbook of lithium and Natural Calcium Chloride. Oxford: Elsevier.



- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). "Chemistry of the elements" segunda edicion. Butterworth – Heinemann.
- Grosjean, C., Miranda, P.H., Perrin, M., Poggi, P., (2012). Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 1735 1744.
- Gupta, A., & Yan, D. (2016). Tubular Ball Mills, Mineral Processing Design and Operations, Elsevier. segunda ed., p. 189-240.
- Huang, Z., Shuai, S., Wang, H., Liu, R., Zhang, S., Cheng, C., Hu, Y., Yu, X., He, G., & Fu, W. (2021). Froth flotation separation of lepidolite ore using a new Gemini surfactant as the flotation collector. *Separation and Purification Technology*. Volumen 282, p. 112 – 119.
- Houot, R., (1983). Beneficiation of iron ore by flotation—a review of industrial and potential applications. *Int. J. Miner. Process.* 10 (3), p. 183 - 204.
- Kesler, S., et al. (2012). "Mineralogía y génesis de minerales de litio". *Geología de Recursos Minerales*, Vol. 28, pp. 210-225.
- Klimpel, R., Isherwood, S., (1991). Some industrial implications of changing frother chemical structure. *Int. J. Miner. Process.* 33 (1-4), p. 369 - 381.
- Leißner, T., Bachmann, K., Gutzmer, J., Peuker, U.A., (2016). MLA-based partition curves for magnetic separation. *Miner. Eng.* 94, 94–103.



- Liu Yuelong, Wang Linlin, Liu Gusheng (2020). Simulación de dinámica molecular de la adsorción del colector de dodecilamina en tres superficies minerales diferentes. *Ingeniería de metales no ferrosos*, vol. (7): p. 82-87.
- Liu, YL; Liu, J. (2014) el proceso de flotacion de la lepidolita en la provincia de Jiangxi en China. *Adv. Madre*, 1033-1034, 1309-1312.
- Mular A. L. & Bhappu. R.B. (1980). *Mineral Processing Plant design*, Society of Mining Engineers (SME) of the American Institute of Mining, 2. ed.
- Montgomery, D. C. (2012) *diseño y anlisis de experimentos*, Jhon Wiley & Sons, Inc., 8. Edicion.
- Nagaraj, D.R., Ravishankar, S.A., (2007). Reactivos de flotación: una descripción crítica desde una perspectiva de la industria En: Fuerstenau, M.C., et al., (Eds.), *Froth Flotation: A Century of Innovation*, Littleton, CO. Estados Unidos, p. 375 - 423.
- Shergold, H.L., 1984. Flotation in mineral processing. In: Ives, K.J. (Ed.), *The Scientific Basis of Flotation*, vol. 75. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, Netherlands, (NATO Advanced Study Institute Series: Series E: Applied Sciences). pp. 229 - 288.
- Paukov, E.I., Kovalevskaya, Y.A., Kiseleva, I.A., Shuriga, T.N., (2010). A low-temperature heat capacity study of natural lithiummicas-heat capacity of zinnwaldite. *J. Therm. Anal. Calorim.* 9, 709–712.
- Pugh, J. K., et al. (1995). "Flotación de minerales de cuarzo y silicatos". *Minería y Metalurgia*, Vol. 40, p. 240-255.



- Pugh, R.J., 2007. The physics and chemistry of frothers. In: sun., Machado Leite, M., Seltmann, R., & Dolgoplova, A. (2018). The Alvarroes-Goncalo Li project: an example of sustainable lithium mining. *Advances in Geosciences*, 45, p. 1-5.
- Qian Wei, Liqin Feng, Liuyang Dong, Fen Jiao, Wenqing Qin, (2021). Selective co-adsorption mechanism of a new mixed collector on the flotation separation of lepidolite from quartz, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 612, p. 125 - 973
- Quinn, J.J., Finch, J.A., (2012). On the origin of bi-modal bubble size distributions in absence of frother. *Miner. Eng.* 36-38, p. 237 - 241.
- Quille calisaya German (2022). Obtencion de carbonato de litio mediante proceso de lixiviación, concentración, evaporación y precipitación. *Dialnet*, Vol. 11-2.
- Klimpel R. R. (2003). Flotación por espuma, enciclopedia de ciencia física y tecnología, tercera edición.
- Robles Figueroa Miguel (2017). Análisis Químico Metalúrgico de minerales y gestión de la calidad en laboratorio ISO/IEC 17025, AMV CONSULTORES.
- Robinson, A. J. (1973). handbook silicate flotation. minerals processing, Vol. 12.
- Rosales, G. G., Ruiz, C. M., Rodriguez, M. H., (2014). Novel process for the extraction of lithium from β -spodumene by leaching with HF. *Hydrometallurgy* 147, p.1-6.
- Shrimali, V. Atluri, X. Wang and Miller J., (2018). "Adsorption of corn starch molecules at hydrophobic mineral surfaces," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 546, p. 194-202,



- Sweetapple, M. T., & Tassios, S. (2015). Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) as a tool for in situ mapping and textual interpretation of lithium in pregmatite minerals. *Am. Mineral*, p. 2141 - 2151.
- Sousa, R., Ramos, V., Guedes, A., Noronha, F., Botelho de Sousa, A., Machado Leite, M., Seltmann, R., & Dolgoplova, A., (2018). The Alvarroes- Goncalo Li project: an example of sustainable lithium mining. *Adv. Geosci.*, 45, p. 1-5.
- Taggart, A. F. (1945). *Handbook of mineral dressing: ores and industrial minerals*. Wiley.
- Trahar, W.J., (1981). A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *Int. J. Miner. Process.* 8 (4), p. 289 - 327.
- USGS. (2023). "Mineral Commodity Summaries: Lithium. U. S. Geological Survey, 98-99.
- Vieceli, N., Durñao, F. O., Guimarñaes, C., Nogueira, C. A., Pereira, M. F. C., & Margarido, F. (2016). Modelado de recuperación de ley y optimización del proceso de flotación por espuma de un mineral de lepidolita. *Journal of Mineral Engineering*, Vol. 25, p. 720-735.
- Yang Gang (2020). Estudio sobre la separacion por flotacion de lepidolita y feldespato que contiene rubidio en condiciones de acido debil. Beijing: Instituto General de Investigacion de Metales no ferrosos de Beijing. P. 1-200.
- Yue, H., & Jial, C. (2014). "Técnicas de flotación para separar minerales de litio". *Procesamiento de Minerales*, Vol. 15, pp. 78-91.
- Wang He, Huang Liang, Bai Hongyang, Wang Kunyu, Wang Zhenhong, Gao Ha o, Zhou Jinsheng, Qin Yan, Wang Yan (2023). Los principales tipos, distr



- ibución y desarrollo y estado de utilización de los recursos de litio en China: revisión y perspectiva *Ciencia*, 46(5): p. 848-866
- Wang, W. Sun, Y. Hu and L. Xu (2014), "Adsorption mechanism of mixed anionic/cationic Collectors in Muscovite–Quartz flotation system," *Minerals Engineering*, vol. 64, p. 44-50.
- Wietelmann, U., Bauer, R.J., (2003). Lithium and lithium compounds, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 20 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany.
- Wills, B.A., Finch, JA y Davenport, W. G. (2006). Tecnología de procesamiento de minerales: una introducción a los aspectos prácticos del tratamiento y recuperación de minerales. Elsevier, vol (2):1-545.
- Wills B. A. (2016). Tecnología de procesamiento de minerales: *Froth Flotation*. Elsevier, vol (12): p. 265-380.
- Wills, B. A.; Napier-Munn, T. (2006). Mineral Processing Technology. An introduction to the practical Aspects ore treatment and Mineral Recovery. Elsevier Science & Technology Books, septima edicion.
- Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). "What are batteries, fuel cells, and Supercapacitors?" *Chemical Reviews*, 104(10), p. 4245 – 4269.
- Whittingham, M. S. (2004). "Lithium batteries and cathode materials" *Chemical Reviews*, 104(10), p. 4271 – 4302.
- Wood, K.R., 2002. Flotation equipment selection and plant layout. Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control. SME, Littleton, CO, USA, p. 1204 - 1238.



Zapana, Y. R. (2020). Extracción de litio por diferentes métodos de lixiviación en tobas volcánicas del depósito Fachani Macusani - Región Puno, 2018, repositorio.unap.edu.pe. p.1-134.

Zhou L. and Zhang Y., (2011) "Flotation separation of Xixia andalusite ore," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 21, p. 1388-1394

ANEXOS

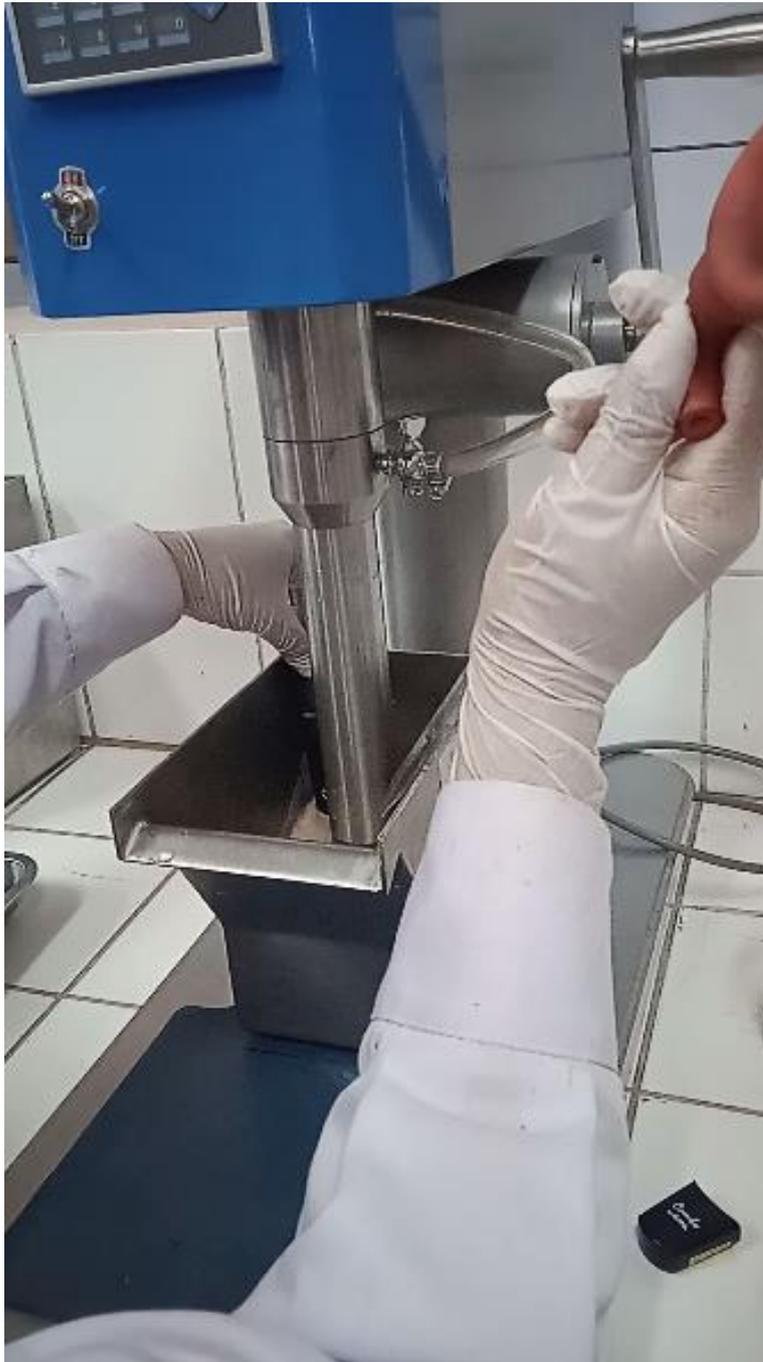
ANEXO 1: Tamizaje del mineral fino utilizando ROTAP.



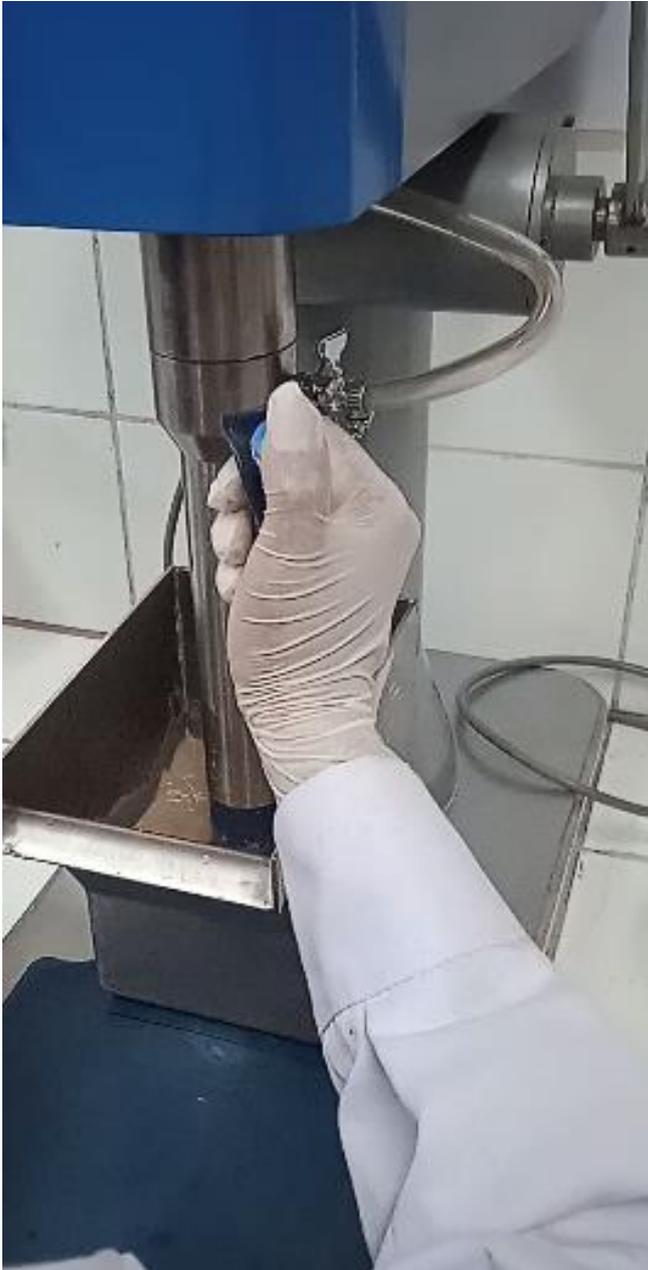
ANEXO 2: Equipo de flotación



ANEXO 3: Ajuste del pH de la pulpa



ANEXO 4: Adición del colector con la ayuda de una micropipeta por una cantidad de 358 μ L



ANEXO 5: Retiro de concentrados



ANEXO 6: Secado de las muestras en la estufa



ANEXO 7: Reactivos de flotación





ANEXO 8: Análisis de laboratorios de analíticos del Sur



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : EC03CCF3

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-23-10066

Fecha de emisión: 5/10/2023

Página 1 de 1

Señores: JUDITH GUTIERREZ PACCO
Dirección: JR. LUIS DALLE N 143. AYAVIRI - MELGAR - PUNO
Atención: JUDITH GUTIERREZ PACCO
Recepción: 30/9/2023
Realización: 30/9/2023
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.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*2102 Li ppm
MN23010514	140	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	2294

Fin del informe



2102 140 140 2294
Omar A. Juárez Soto
Gerente Técnico
Calle 140 - Melgar - Puno

Firmado por: JUÁREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES S.M.S. Ingeniero Químico QIP 114408. Empresa certificada LUMMA PE 5702023 17:35:19

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

*=Valor numérico=Límite de detección del método, %<Valor Numérico=Límite 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 solo 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.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

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)444562.





ANEXO 9: Análisis de laboratorios de fluorescencia de rayos X



II. ANÁLISIS QUÍMICO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Muestra MN21011941-CM-1

Análisis Químico Semicuantitativo

Elemento	%
Si	31.74
Al	10.06
K	3.48
Na	2.62
Fe	0.34
P	0.19
Rb	0.18
Mn	0.07
Ca	0.05
Y	0.03
Sn	0.02
Zn	0.01

OBSERVACIONES:

- Los resultados corresponden a la muestra proporcionada por el cliente.
- Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento.
- %: Porcentaje masa-masa (g/g).
- ppm: Relación masa-masa ($\mu\text{g/g}$).
- Límite de Detección de la técnica (L.D.): 100 ppm.



ANEXO 10: Análisis de laboratorio por difracción de rayos X

III. ANALISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Muestra MN21011941-CM-1

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	35
Plagioclasa (Albita)	(Na,Ca)(Al,Si) ₄ O ₈	30
Feldespato - Na (Sanidina)	(K,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	19
Mica (Muscovita)	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	9
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5

() Mineral de la familia que se encuentra con mayor grado de certeza.

OBSERVACIONES DE ANÁLISIS DRX:

- Los resultados corresponden a las muestras proporcionadas por el cliente, las cuales han sido entregadas en las instalaciones del laboratorio.
- Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento.
- %: Porcentaje masa relativa (g/g).
- < L. D.: Mineral identificado cuya cuantificación está por debajo del 1%.

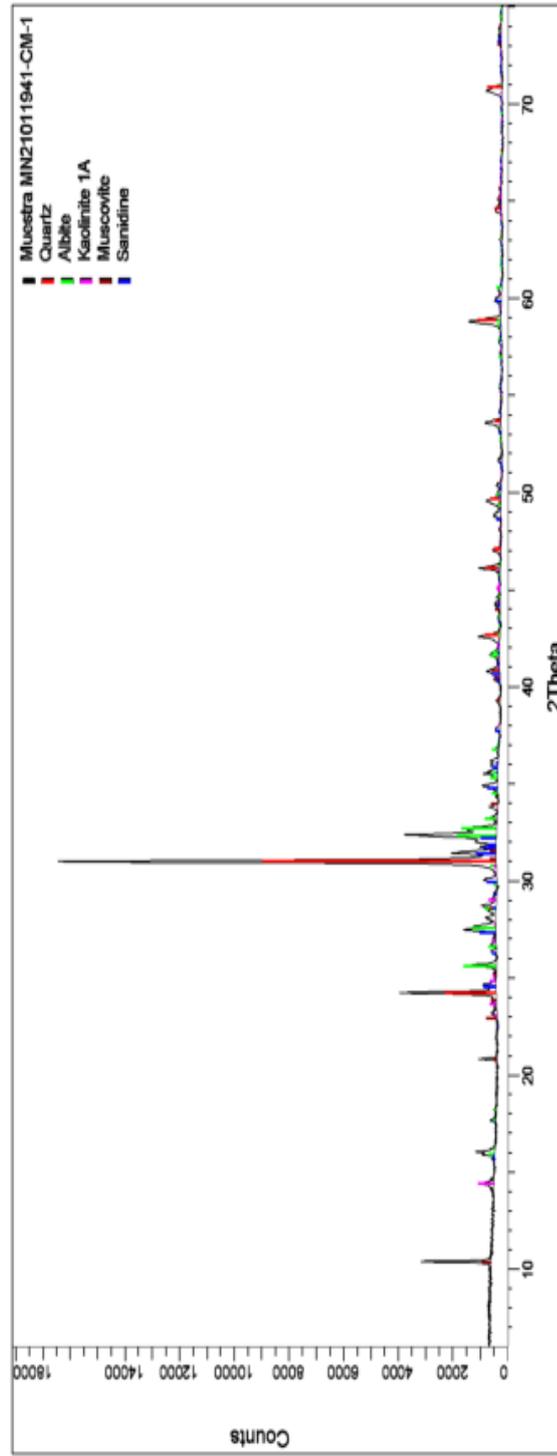
ANEXO 11: Espectro de difracción de rayos X



INFORME DE ENSAYO

OTIV-106 Rev. 0
04/05/2021

Figura 1. Difractograma de la Muestra MN21011941-CM-1 con los respectivos minerales identificados





ANEXO 12: Análisis de concentrados



Universidad Nacional del Altiplano
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ANÁLISIS DE MINERAL LITIO
N° 10-LA136

ASUNTO: Análisis de metales pesados por Espectrofotómetro de Emisión Atómica por Plasma Microondas 4210 MP-AES	CODIGO DE LABORATORIO: L01LA136 N° ORDEN: LMEA - 4210 - MP - AES FECHA DE INGRESO: 18/12/2023 TIPO DE SERVICIO: Único SOLICITANTE: Judith Gutierrez Pacco
TESIS: "OBTENCIÓN DE CONCENTRADO DE ÓXIDO DE LITIO (L2O) POR FLOTACIÓN DE TOBAS VOLCÁNICAS MACUSANI - PUNO"	

INFORMACIÓN DE LA MUESTRAS MINERAL

EMPAQUE PRIMARIO: Bolsas de Ziploc transparente	TEMPERATURA DEL RECIPIENTE: <input checked="" type="checkbox"/> Ambiente <input type="checkbox"/> Refrigeración
TIPO DE MUESTRA: MINERAL	FECHA DE INICIO DE ANÁLISIS: 19/12/2023
DESCRIPCIÓN DEL SOLICITANTE: Análisis de Metales de Pesados	
CANTIDAD DE MUESTRAS: 13/13	
Coordenadas UTM DATUM WGS - 84 L19	Este: 318368 Norte: 8451673 Altitud: 4764msnn

I.- RESULTADO DE ANALISIS DE AGUA

N°	Li 670.115 nm	Método de Ensayo
M_1	2294 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_2	8176 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_3	8269 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_4	8408 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_5	8826 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_6	8454 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_7	9012 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_8	9198 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_9	10312 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_10	8547 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_11	8594 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_12	8454 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES
M_13	8361 ppm	Por digestión Multi acida 4210 MP-AES




M.Sc. Fidel Huiza Mamani
JEFE DEL LABORATORIO L.M.E.A.
UNA-PUNO-GIP.20768

Los resultados corresponden solamente a las muestras analizadas en el laboratorio se prohíbe la reproducción parcial de este sin la aprobación escrita del laboratorio

Escaneado con CamScanner

ANEXO 13: Ubicación de la coordenada de muestreo



Fuente: Google Earth, (2024)



ANEXO 14: 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 Judith Gutierrez Paezo
identificado con DNI 47979866 en mi condición de egresado de:

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

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

"Obtención de concentrado de ácido de litio (Li2O) por flotación de fobas Volcanicas Maricani - 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 22 de mayo del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



ANEXO 15: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



VRI
Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Judith Guzmán Páez
identificado con DNI 47979866 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:
" Obtención de concentrado de óxido de litio (Li₂O) por flotación de
Jobas volcánicas Marcasap - 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 22 de mayo del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella