



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Maestría en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

Desarrollo y optimización del proceso de flotación para minerales de sulfuros de cobre obtenidos en la cordillera del Condor, en las coordenadas, latitud: 9604245 y longitud: 784884, provincia de Zamora Chinchipe.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Magister en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

AUTOR:

Cristian Andrés Ludeña Guamán

DIRECTOR:

Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2025

Certificación

Loja, 20 de febrero de 2025

Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Desarrollo y optimización del proceso de flotación para minerales de sulfuros de cobre obtenidos en la cordillera del Condor, en las coordenadas, latitud: 9604245 y longitud: 784884, provincia de Zamora Chinchipe**, previo a la obtención del título de **Magister en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, de la autoría del estudiante **Cristian Andrés Ludeña Guamán, con cédula de identidad Nro.1103993760**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Cristian Andrés Ludeña Guamán**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual

Firma:

Cédula de identidad: 1103993760

Fecha: 28 de febrero del 2025

Correo electrónico: cristian.ludena@unl.edu.ec

Teléfono: 0988781711

**Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total,
y/o publicación electrónica del texto completo del Trabajo de Titulación**

Yo, **Cristian Andrés Ludeña Guamán**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Desarrollo y optimización del proceso de flotación para minerales de sulfuros de cobre obtenidos en la cordillera del Condor, en las coordenadas, latitud: 9604245 y longitud: 784884, provincia de Zamora Chinchipe**, como requisito para optar por el título de **Magister en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional. Los usuarios pueden consultar el contenido de ese trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los cinco días del mes de febrero del dos mil veinticinco.

Firma:

Autor: Cristian Andrés Ludeña Guamán

Cédula de identidad: 1103993760

Dirección: Loja, Ecuador

Correo electrónico: cristian.ludena@unl.edu.ec

Teléfono: 0988781711

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Stalin Iván Puglla Arévalo Mg. Sc.

Dedicatoria

A mi familia, que ha sido mi refugio y mi fortaleza en cada paso de este arduo viaje. A mi esposa, mi compañera de vida, que me has dado tu amor, tu comprensión y tu paciencia en cada momento, incluso cuando las fuerzas parecían ceder. Eres la razón por la que no me he rendido, y por la que sigo soñando.

Y a ti, mi querido hijo, quien con tu sonrisa y tus abrazos me has recordado que lo más importante no es el destino, sino el amor que compartimos en el camino.

Esta tesis no es solo un logro mío; es el reflejo de todo lo que ustedes me han dado, de todo lo que hemos construido juntos. Sin ustedes, este sueño nunca habría sido posible.

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este proyecto.

A mis padres, por su amor incondicional y por haberme enseñado el valor del esfuerzo, la dedicación y la perseverancia. Gracias por ser mis pilares, por guiarme siempre con su ejemplo y por darme todo lo que necesitaba para llegar hasta aquí.

A mi esposa, quien ha sido mi mayor fuente de inspiración, paciencia y amor. No hay palabras suficientes para agradecerte todo lo que has hecho por mí, por estar a mi lado en cada momento, y por darme la tranquilidad de saber que, no importa lo difícil que fuera el camino, siempre estarías conmigo.

A mi hijo, cuya presencia en mi vida me ha enseñado que el verdadero propósito de todo lo que hago es darles a ustedes un mejor futuro, por darme fuerzas y por hacerme recordar que todo esfuerzo vale la pena cuando es por los que más amo.

Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos y por su incansable apoyo.

Índice de contenido

Portada	ii
Certificación	ii
Autoría	iii
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenido	vii
Índice de tablas:	ix
Índice de figuras:	x
Índice de anexos:	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico	7
4.1 Generalidades	7
4.2 Conminución	7
4.2.1 Trituración	7
4.2.2 Molienda.....	7
4.2.3 Etapas de molienda.....	8
4.2.4 Importancia del proceso de la molienda en el beneficio de minerales	9
4.3 Proceso de Flotación	9
4.4 Reactivos para la Flotación	9
4.4.1 Colectores	9
4.4.2 Modificadores.....	10
4.4.3 Espumantes.....	10
4.5 Equipos de Laboratorio	11
5. Metodología	12
5.1 Depósito Mineral	12
5.2 Caracterización mineralógica	13
5.3 Enfoque metodológico	15
5.4 Recopilación de la información.....	15

5.5	Trabajo de campo	16
5.5.1	Técnica de Muestreo	16
5.6	Ensayos de Laboratorio	16
5.6.1	Secado de la muestra	16
5.6.2	Trituración del material	16
5.6.3	Molienda.....	17
5.6.4	Ensayos de flotación.....	20
5.6.5	Preparación de muestras	22
5.6.6	Elaboración de informe	24
6.	Resultados	25
6.1	Tiempos óptimos de molienda	25
6.2	Tiempos óptimos de molienda	26
6.2.1	Ensayos de pH.....	26
6.2.2	Ensayos de dosificación	28
6.2.3	Ensayos de remolienda.....	29
6.2.4	Flotación final	30
7.	Discusión	33
8.	Conclusiones	36
9.	Recomendaciones	37
10.	Referencia bibliográfica.....	38
11.	Anexos	40

Índice de tablas:

Tabla 1 Resultados de las flotaciones con variación del pH.	8
Tabla 2 Resultados de tiempo de molienda.....	25
Tabla 3 Flotación con dosificación de estándar	26
Tabla 4 Primer ensayo de dosificación de Cal	27
Tabla 5 Segundo ensayo de dosificación de Cal	27
Tabla 6 Tercer ensayo de dosificación de Cal.....	27
Tabla 7 Primer ensayo de dosificación de colector y espumante.....	28
Tabla 8 Segundo ensayo de dosificación de colector y espumante.....	28
Tabla 9 Tercer ensayo de dosificación de colector y espumante	29
Tabla 10 Tiempos de remolienda	29
Tabla 11 Resultados de flotación final	31

Índice de figuras:

Figura 1. Cinturón de Cobre del Pangui.....	12
Figura 2. Proyectos Estratégicos de minería en el Ecuador	13
Figura 3. Cuarzo – monzonita, bajo luz transmitida (izquierda), roca (derecha).....	14
Figura 4. C Porcentaje de minerales bajo el microscopio	14
Figura 5. Metodología usada en el proyecto	15
Figura 6. Trituradora de Mandíbula y Rodillo	17
Figura 7. Pulverizado de muestras	18
Figura 8. Liberación de la partícula de interés	19
Figura 9. Liberación de la partícula de interés	19
Figura 10. Esquema base de flotación.....	21
Figura 11. Ensayos de flotación	22
Figura 12. Espuma de concentrado de Cobre.....	22

Índice de anexos:

Anexo #1. Registro Fotográfico de los Equipos Empleados	40
Anexo #2. Registro de resultados de laboratorio.	43
Anexo #3. Certificado de traducción.....	47

1. Título

“Desarrollo y optimización del proceso de flotación para minerales de sulfuros de cobre obtenidos en la cordillera del Condor, en las coordenadas, latitud: 9604245 y longitud: 784884, provincia de Zamora Chinchipe”

2. Resumen

La flotación es uno de los procesos más ampliamente utilizados en la industria minera para la concentración de minerales, especialmente en la extracción de metales valiosos como es el cobre.

El cobre, presenta una problemática en la que los minerales que lo albergan son altamente variados y a menudo presentan complejidades que requieren de un tratamiento especializado para lograr una recuperación.

El objetivo de este estudio es analizar y optimizar el proceso de flotación de cobre en condiciones de laboratorio, evaluando los efectos de diversos parámetros operativos y reactivos sobre la eficiencia del proceso.

El presente trabajo de investigación involucro un enfoque mixto para llevar a cabo los ensayos y dar cumplimiento con los objetivos propuestos, esto quiere decir que se utilizó metodologías cualitativas y cuantitativas.

Ya en el análisis químico se encontraron leyes de cabeza de 0.5240 % de Cu y de 2.17% de S.

Y una vez finalizados todos los ensayos, se procedió a realizar una prueba con todas las variables operativas encontradas en las pruebas, dando resultados muy favorables, ya que en una muestra de 500 g se consiguió 9.5 g de concentrado de Cu con una ley de 24.75 % Cu, con una recuperación del 85.12% y un rendimiento de 1.94%.

Por lo que podemos concluir que los ensayos para establecer y optimizar un circuito de flotación fueron un éxito.

Palabras clave: flotación, procesos, optimizar, cobre, azufre, leyes, análisis.

Abstract

Flotation is one of the most widely used processes in the mining industry for the concentration of minerals, especially in the extraction of valuable metals such as copper.

Copper harbors the problem in which the minerals that contain it are highly varied and often present complexities that require specialized treatment to achieve its recovery.

The objective of this research is to analyze and optimize the copper flotation process under laboratory conditions, evaluating the effects of various operational and reagent parameters on the process efficiency.

This research work involved a mixed approach to carry out the tests and achieve the proposed objectives, for this qualitative and quantitative methodologies were used.

In the chemical analysis, head grades of 0.5240% Cu and 2.17% S were found already.

Once all the tests were completed, a test was carried out with all the operational variables found in the tests, giving very favorable results, since in a 500 g sample, 9.5 g of Cu concentrate was obtained with a grade of 24.75% Cu, recovery of 85.12% and a yield of 1.94%.

Therefore, we can conclude that the tests to establish and optimize a flotation circuit were a success.

Keywords: flotation, processes, optimize, copper, sulfur, grades, analysis.

3. Introducción

La Cordillera del Cóndor forma parte de la frontera internacional entre Ecuador y Perú, y a lo largo de la historia ha sido testigo de conflictos bélicos entre estos países, siendo un desencadenante la búsqueda de sus riquezas, ya que diversos estudios han revelado una importante biodiversidad que reúnen especies únicas de flora y fauna, así como, riquezas en sus profundidades entre las que destacan yacimientos de minerales como oro, plata, cobre, y molibdeno.

Con tantos recursos minerales, la Cordillera del Cóndor se ha posicionado como una de las principales áreas de los proyectos estratégicos del país, ya que cuenta con dos proyectos mineros a gran escala, como son la mina Mirador. y la mina Fruta del Norte. Estas minas son las pioneras en minería a gran escala en el Ecuador, (Figura 2).

El presente trabajo de investigación está centrado en una mena previamente caracterizada donde el mineral de interés económico es el cobre. En este caso la metodología para la extracción de este mineral de la mena requiere la elaboración de un sistema de concentración físico químico que es la flotación.

La flotación es uno de los procesos más ampliamente utilizados en la industria minera para la concentración de minerales, especialmente en la extracción de metales valiosos como es el cobre. Este proceso, basado en la separación de partículas minerales a través de su afinidad por el aire y el agua, ha evolucionado a lo largo de los años, adaptándose a las necesidades de eficiencia y rentabilidad en la minería moderna (Gaudin, 1957)

En el caso del cobre, presenta una problemática en la que los minerales que lo albergan son altamente variados y a menudo presentan complejidades que requieren de un tratamiento especializado para lograr una recuperación óptima del metal (Araujo, Lima, & Silva, 2014)

El objetivo de este estudio es analizar y optimizar el proceso de flotación de cobre en condiciones de laboratorio, evaluando los efectos de diversos parámetros operativos y reactivos sobre la eficiencia del proceso. Tomando inspiración en autores como Jones & Spottiswood, que ofrecen una explicación de los principios que se utilizan para diseñar pruebas de laboratorio y entender los mecanismos involucrados, además de escritores como Yoon & Luttrell, quienes buscan profundizar en la investigación de métodos experimentales y ensayos de flotación en el laboratorio.

Para la ejecución de estos se ensayos se ha tomado en cuenta factores como el pH, concentración de la pulpa, cantidad y tipo de reactivos (colectores, espumantes y modificadores), simulando las condiciones operativas de la planta de beneficio mineral, para de esta manera poder evaluar el impacto de las diferentes condiciones de operación sobre el rendimiento del proceso. Con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio se realiza una comparación para identificar los parámetros óptimos que mejoren la eficiencia de la flotación para su posterior aplicación en la planta de beneficio..

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar y optimizar el proceso de flotación para minerales de sulfuros de cobre obtenidos en las coordenadas Norte: 9 604 245 y Este: 784 884.

Objetivos Específicos

- Definir los tiempos de molienda para obtener una correcta liberación del mineral.
- Realizar el esquema de flotación con la dosificación adecuada para minerales de sulfuro de cobre.
- Lograr una recuperación de cobre mayor al 85 %.

4. Marco Teórico

4.1 Generalidades

Los procesos mineros suelen abarcar una serie de actividades diseñadas para la extracción de minerales valiosos de la corteza terrestre, los cuales suelen variar dependiendo el tipo de mineral, el lugar y las características del yacimiento. A continuación, se definen estas actividades como: exploración, extracción, conminución, beneficio, transporte y cierre de mina.

El beneficio mineral es el conjunto de procesos y operaciones industriales que se realizan para extraer los metales o minerales valiosos de un mineral extraído de la tierra. El objetivo del beneficio mineral es separar los minerales útiles o valiosos de los materiales no deseados (llamados gangas), de forma que los productos finales tengan la mayor pureza posible y sean aptos para su comercialización o transformación en productos más complejos.

Para poder desglosar y entrar en detalle del presente trabajo de investigación, se describe los procesos que influyen en la búsqueda de los objetivos planteados

4.2 Conminución

La conminución es uno de los procesos más importantes en la industria minera y se refiere a la reducción del tamaño de los materiales para su posterior procesamiento.

Se basa en dos principios fundamentales: la fractura y la abrasión. Los procesos involucrados en la conminución son la trituración, la molienda y la clasificación.

4.2.1 Trituración

La trituración es el proceso de reducción de tamaño de materiales en trozos más pequeños. Se realiza mediante la aplicación de fuerza mecánica en la superficie del material. El objetivo de la trituración es reducir el tamaño del material para su posterior procesamiento.

Se lleva a cabo en diferentes etapas, dependiendo del tamaño de la alimentación y el tamaño deseado del producto final. (Kelly & Spottiswood, 1990)

4.2.2 Molienda

La molienda es una operación que permite la reducción del tamaño del mineral hasta tener una granulometría final deseada.

La molienda es donde se realiza la verdadera liberación de los minerales valiosos y se encuentra en condiciones de ser separados de sus acompañantes. (Zamora)

El laboratorio cuenta con un molino de bolas con las siguientes especificaciones, (Figura 9).

Tabla 1 Resultados de las flotaciones con variación del pH.

Especificaciones Técnicas			
Modelo	XMQ Conical Ball Mill		
(XMQ 240 x 90)			
Capacidad interna	7000 ml		
Tamaño de alimentación (mm)	< 3		
Tamaño de salida (µm)	74 a 20		
Potencia del motor (kw)	0.55		
	D (mm)	#	Peso (gr)
Carga de molienda	28	15	1514.87
	23	68	3914.96
	17.5	136	3894.98
Dimensiones (mm)	1052 * 640* 1160		
Peso (kg)	170		
Vc, Velocidad rotacional (rpm)	57		
Origen	Jangxi, China		

4.2.3 Etapas de molienda

La molienda puede realizarse en seco o en húmedo. Se llama molienda seca cuando el mineral es alimentado en tal estado. Si se agrega agua, se forma una pulpa, y se denomina molienda húmeda.

Dependiendo de la fineza del producto final, la podemos dividir en las siguientes etapas:

- **Primaria**, es aquella que sigue de la etapa de chancado, y dependiendo del sistema que se tenga se utiliza molinos SAG, bolas o barras.
- **Secundaria**, es la sucesión de la molienda primaria y es para obtener material más fino
- **Terciaria o remolienda**, es una etapa que no es obligatoria, y es aplicable después del primer proceso de concentración (flotación), se suele utilizar los molinos de bolas o molinos verticales y el producto obtenido es material ultrafino

4.2.4 Importancia del proceso de la molienda en el beneficio de minerales

La molienda es la última etapa de reducción de tamaños y es un proceso fundamental para lograr una óptima liberación del mineral, jugando así un papel crucial para lograr la recuperación de las partículas útiles para la concentración.

Si el tamaño de la partícula no es el adecuado va a dificultar el proceso de metalurgia, el exceso de partículas finas va a generar pérdidas económicas y desde un punto de vista técnico podría afectar la recuperación global del proceso

4.3 Proceso de Flotación

Se define como un proceso físico - químico que separa los minerales sulfurados del metal de otros minerales y especies.

Durante este proceso, el mineral molido se adhiere superficialmente a burbujas de aire previamente insufladas, lo que determina la separación del mineral de interés.

En la etapa previa que es la molienda se obtiene la pulpa con las cuales se alimenta las celdas de flotación y se le adiciona los reactivos para conseguir una pulpa homogénea con la finalidad de darle tiempo a los reactivos actuar y poder dar inicio al proceso de flotación. (CODELCO, 2019)

4.4 Reactivos para la Flotación

4.4.1 Colectores

Es un compuesto orgánico, cuyo papel es hidrofobizar las partículas de mineral, las cuales se absorben en la superficie de la partícula mineral de forma selectiva. (Conejos Trujillo, 2003)

Existe un sin número de colectores, pero los más comunes son los xantatos.

Para nuestro caso de investigación trabajaremos con el xantato isobutílico de sodio, el cual se obtiene por la reacción del alcohol isobutílico con el bisulfuro de carbono e hidróxido de sodio.

Es un colector de minerales sulfurados y se aplica especialmente en la flotación de la pirita que contiene oro, sin embargo, constituye un poderoso colector para minerales de cobre. (Renasa, 2020)

4.4.2 Modificadores

Sirven para regular las condiciones de funcionamiento de los colectores y aumentar su selectividad, en ellos se tiene los reguladores de pH, depresantes y activadores. (Conejos Trujillo, 2003)

En relación costo – beneficio, el modificador más usado es el óxido de calcio (CaO), comúnmente llamado Cal, esta nos sirve como un regulador de pH, y además si se lo usa en la etapa de molienda genera un efecto abrasivo en combinación con las bolas de acero, lo que ayuda a una mejor liberación del mineral

4.4.3 Espumantes

Son agentes tensoactivos, que mantienen las partículas en la superficie de la solución y juegan un papel activo en la cinética de flotación. (Conejos Trujillo, 2003)

Su estructura les permite agruparse hasta formar otra fase distinta del resto del fluido, formando una espuma que separa el mineral del resto de la ganga. Tiene como objetivo producir burbujas resistentes, de modo que se adhieran al mineral de interés. (CODELCO, 2019)

En el mercado podemos encontrar mucha variedad de espumantes, donde tenemos que el más común para ser usado en el proceso de flotación es el aceite de pino, por sus bajos costos.

No obstante, para nuestras pruebas se aplicará el espumante F-501, el cual otorga una cinética rápida y un bajo consumo en circuitos de flotación de sulfuros, elaborado y distribuido por CYTEC. Presenta una composición basada en:

- **Polímeros no iónicos:** agentes espumantes y estabilizadores
- **Compuestos de siloxano o siliconas:** mejoradores de la estabilidad de la espuma
- **Emulsificantes:** para mejorar la dispersión en líquidos
- **Solventes y estabilizantes:** para asegurar la eficacia y estabilidad
- **Agua:** base de disolución.

Los principales ventajas de usar este espumante y las diferencias en comparación con otros son:

- **Eficiencia en la separación:** Al generar una espuma estable y bien controlada, el espumante F 501 mejora la eficiencia en la separación de minerales valiosos y residuos.
- **Reducción de problemas operacionales:** Al controlar el tamaño y la densidad de la espuma, el espumante previene la formación excesiva de espuma, lo cual podría dañar equipos y procesos.
- **Mejora la capacidad de carga:** Una espuma bien formada y estable puede aumentar la cantidad de mineral o material reciclado que se puede procesar en un tiempo determinado.

4.5 Equipos de Laboratorio

Contar con un laboratorio metalúrgico equipado es indispensable para lograr los objetivos planteados, por tal razón importante trabajar con equipos adecuados para cumplir con los procedimientos necesarios en el área de procesamiento mineral así que en el lugar de investigación se cuenta los siguientes equipos, ver Anexos 1.

- Trituradoras (mandíbulas y rodillos).
- Molino de bolas para laboratorio.
- Celdas SANZEAL
- Pulverizadoras de tres cabezas
- Morteros
- Hornos
- Filtros prensa.

5. Metodología

5.1 Depósito Mineral

La mineralización forma parte del denominado “Cinturón de cobre del Pangui” (Figura 1), y se encuentra ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, cantón el Pangui, parroquia Tundayme con aproximadamente 2.985 hectáreas, por lo que geográficamente se sitúa en el corazón de la Cordillera del Condor, la cual esta emplazada entre Ecuador y Perú.

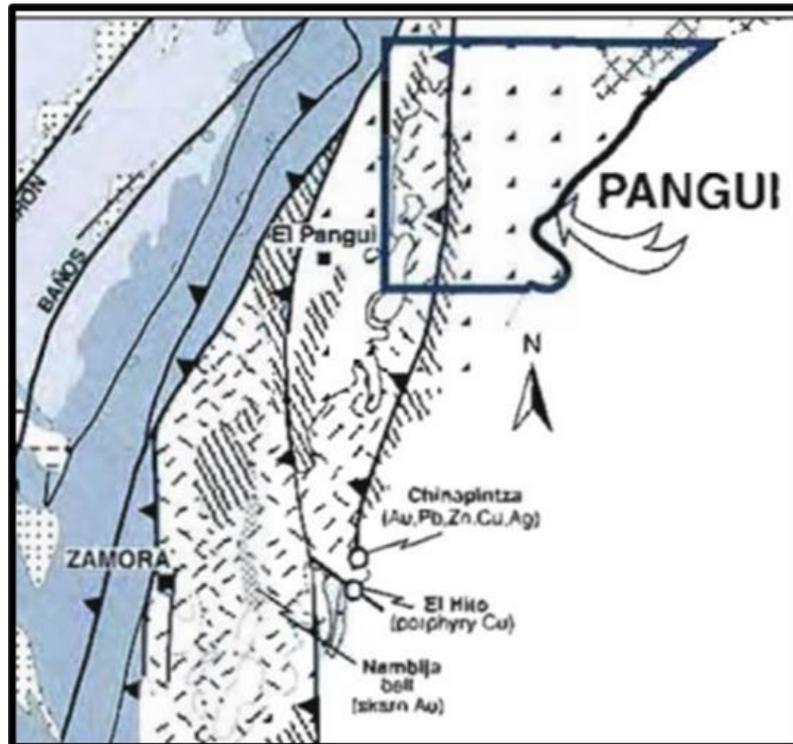


Figura 1. Cinturón de Cobre del Pangui.

Fuente: (Gendall, y otros, 1995)

Este yacimiento forma parte de los proyectos estratégicos a gran escala del Ecuador, (Banco Central del Ecuador, 2021), (Figura 2). Contiene una mineralización de pórfido de Cu-Mo, asociados con stocks de pórfidos cupríferos compuestos de granodiorita a monzogranito (Gendall, y otros, 1995)

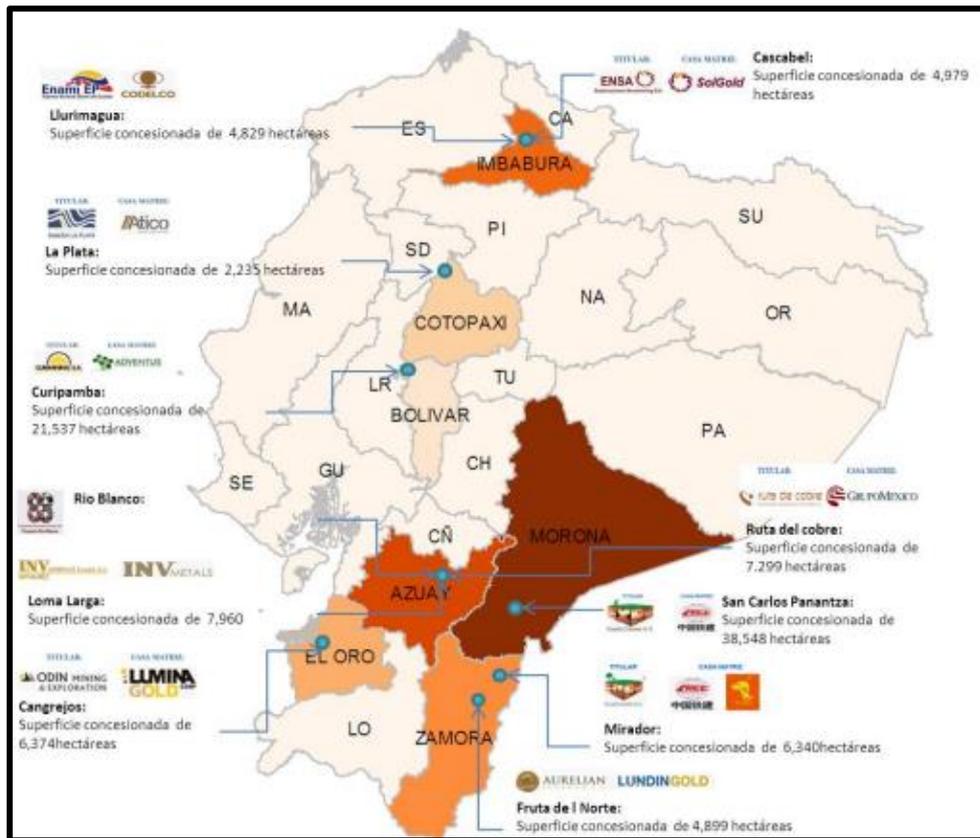


Figura 2. Proyectos Estratégicos de minería en el Ecuador
Fuente: (Banco Central del Ecuador, 2021)

La zona de mineralización a investigar se define como un pórfido temprano el cual en la caracterización mineralógica se determinó que contiene un 1,5% de pirita, 1,2% de calcopirita y presenta una alteración clorítica, siendo un desafío obtener una alta recuperación de cobre en este tipo mineralización por la cantidad de minerales arcillosos que pueden generar y el bajo porcentaje de calcopirita (mineral mena de Cu).

5.2 Caracterización mineralógica

Aspecto macroscópico: Representa la intrusión hipoabisal y la mineralización presente en el sistema mesotermal de pórfido de cobre, petrográficamente constituye una roca ígnea de composición de Pórfido de cuarzo-monzonita (ver Figura 3), presentan fenocristales de hornblenda euhedrales hasta 1 centímetro de largo y plagioclasas muy abundantes en una masa fundamental afanítica de plagioclasas, feldespato potásico y cuarzo. Se consideran pórfidos con una proporción mayor de fenocristales sobre la matriz. Corresponde a roca mineralizada al ser asociada al evento de mineralización en el yacimiento.

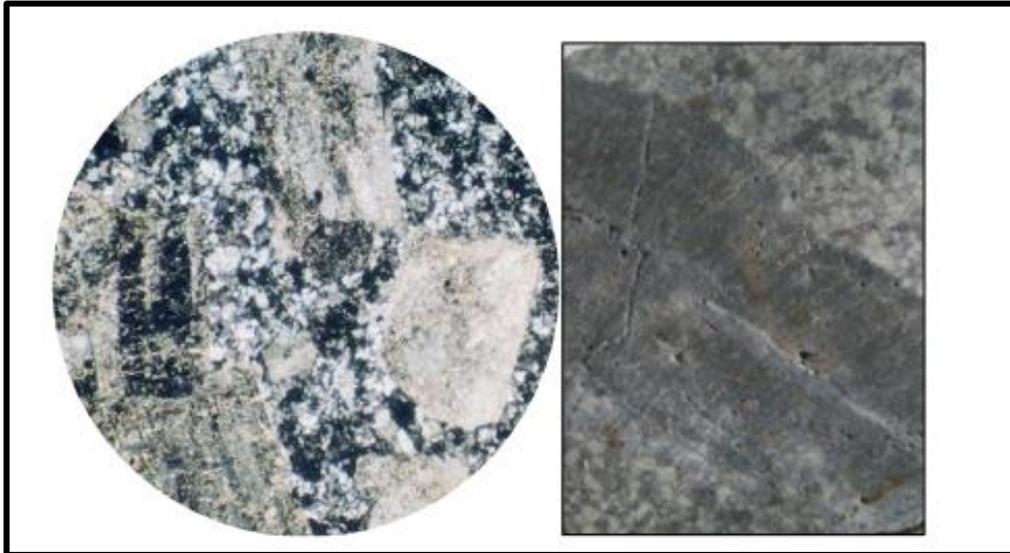


Figura 3. Cuarzo – monzonita, bajo luz transmitida (izquierda), roca (derecha)
Fuente: (Alulima & Vega, 2021)

Aspecto microscópico: La muestra exhibe esencialmente fenocristales de plagioclasa sobre una matriz de feldespatos potásicos, además de plagioclasa y cuarzo microgranular, con chispas de clorita, epidota y rutilo. Los sulfuros como la calcopirita en granos irregulares y pirita de entre 10 a 300 micrones de tamaño, se encuentran como subhedrales diseminados (ver Figura 4).

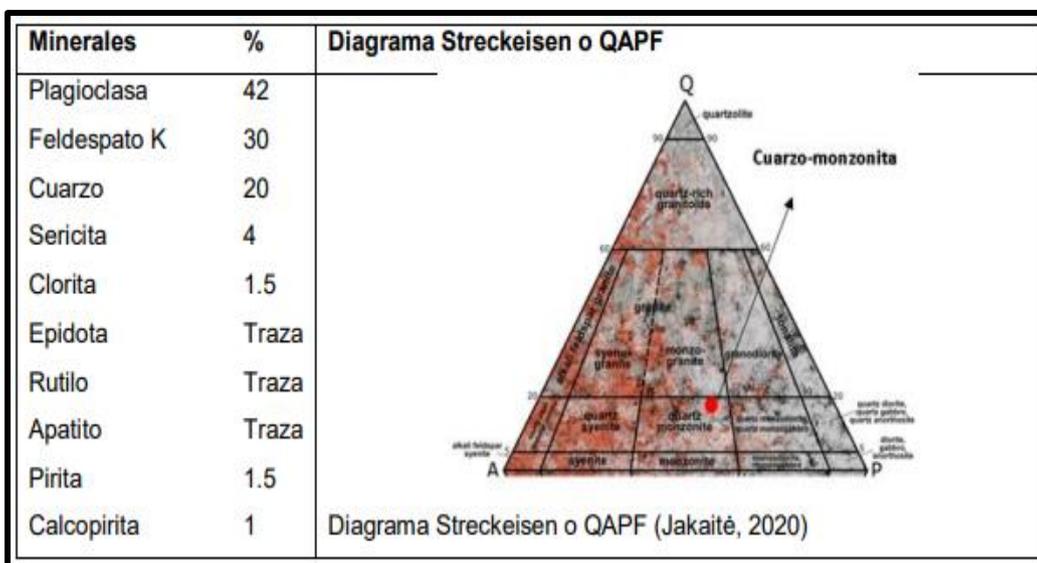


Figura 4. C Porcentaje de minerales bajo el microscopio
Fuente: (Alulima & Vega, 2021)

5.3 Enfoque metodológico

El presente trabajo de investigación involucró un enfoque mixto utilizando las metodologías cualitativas y cuantitativas, para la ejecución de ensayos y análisis de resultados, así dando cumplimiento a los objetivos propuestos inicialmente.

En el diagrama de flujo de la Figura 5 se representa la metodología empleada, como la secuencia de actividades que se siguió durante el presente proyecto de investigación



Figura 5. Metodología usada en el proyecto

5.4 Recopilación de la información

Antes de iniciar los ensayos en el laboratorio es necesario tener un conocimiento sobre la mena con la cual se va a realizar las pruebas, para esto se recopiló información geológica de la mineralización para comprender los tipos de alteraciones que presenta la roca caja.

Al definir las características mineralógicas de la mena se buscó información para conocer cómo reaccionan los minerales de sulfuro de cobre frente al cambio de factores

fisicoquímicos, la importancia de tener una buena liberación del mineral, además de investigar sobre otros ensayos de flotación a minerales de sulfuro de cobre, para comprender los problemas a los que se enfrentaron y como solventarlos

5.5 Trabajo de campo

5.5.1 Técnica de Muestreo

Definido la zona de mineralización que es el pórfido de cobre en sus respectivas coordenadas, y una vez que el material de mena entro a la pila de acopio o también llamado domo de acopio, se procedió a realizar la toma de la muestra, confirmando con el personal de mina y con el personal encargado del área que la muestra pertenezca exactamente a la zona mineralizada en el estudio.

Con una pala y en puntos seleccionados sin un esquema definido, o sea, de manera aleatoria para mayor representatividad se tomó la muestra del mineral para su posterior análisis.

5.6 Ensayos de Laboratorio

5.6.1 Secado de la muestra

Terminado el muestreo se procede a colocar el material en una lona de geotextil en el suelo para secarlo, esto debido a que si lo colocamos en un horno se presenta el riesgo de alterar la muestra. El tiempo de secado va a variar y va a depender de la temperatura ambiental, por lo general el material tarda en secar de 24 a 48 horas.

5.6.2 Trituración del material

Comenzamos con la primera etapa de conminución que es la trituración, se cuenta con dos tipos de trituradoras que son de mandíbulas y rodillos, las cuales representan a una etapa de trituración primaria y secundaria respectivamente. (ver Figura 6)

El material de alimentación a la trituradora de mandíbulas tiene un tamaño aproximado de 30 cm de diámetro, y la descarga sale con un tamaño entre 2 - 5 cm de diámetro, de esta manera puede ingresar a la segunda trituradora de rodillo donde el resultado del proceso es un material menor a los 4 mm de diámetro.

Una vez termina la trituración del mineral se realiza una homogenización con el objetivo de evitar la que las partículas más grandes queden en las partes bajas, es decir se produzca una segregación de las partículas.

Finalmente, con el material triturado y homogenizado se procede a guardarlo en sacos y posteriormente en un frigorífico, con el propósito que conserve la humedad y no pierda sus propiedades físicas hasta iniciar la segunda etapa de los ensayos de conminución y flotación.

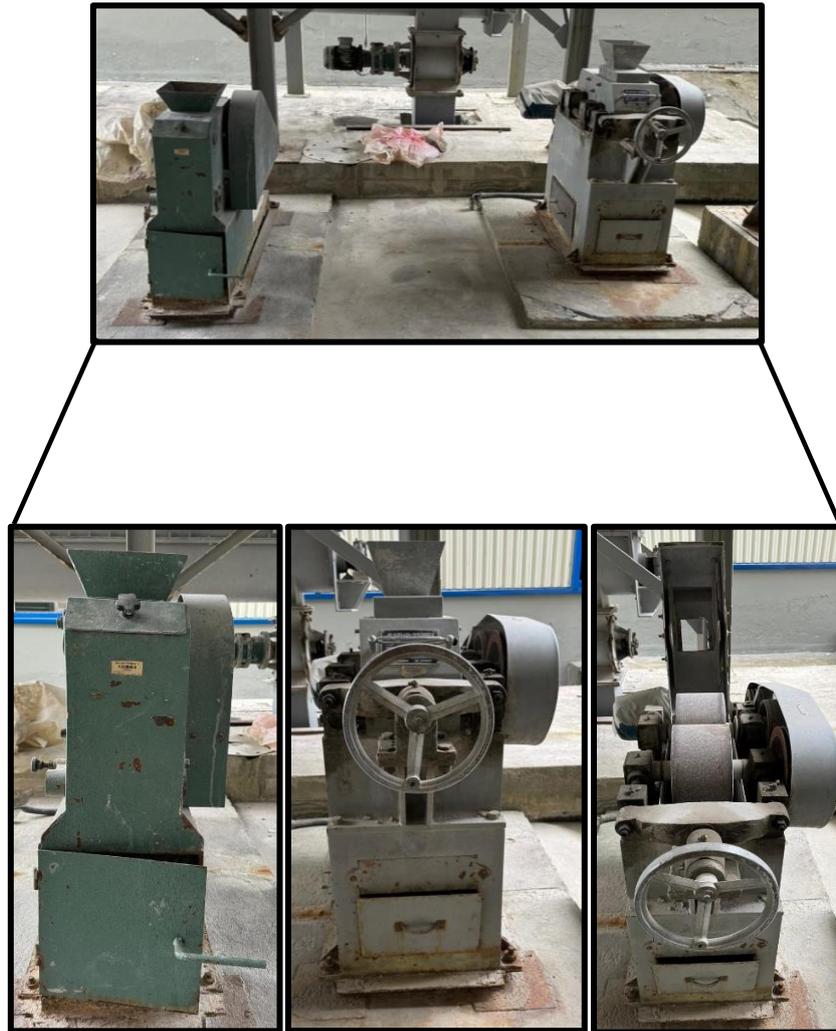


Figura 6. Trituradora de Mandíbula y Rodillo

5.6.3 Molienda

Antes de iniciar con los ensayos de molienda es necesario conocer la ley de cabeza, para ello se realiza una pulverización de una muestra representativa del material a ensayar (ver

Figura 7) para enviar a la ejecución del análisis químico en el cual obtendremos las leyes iniciales de cobre (Cu) y azufre (S) o también denominadas leyes de cabeza.



Figura 7. Pulverizado de muestras

Iniciamos con los ensayos de molienda para la liberación de la partícula que tiene como objetivo obtener una partícula de mineral valioso que esté separado de la ganga y tenga un tamaño óptimo para la siguiente etapa de flotación.

En la Figura 8 se indica como el mineral de mena contenido en la roca caja se llega a una liberación primaria a través del proceso de la molienda separando los minerales de interés de la ganga.

En nuestro caso buscamos encontrar el D60, es decir, que un 60% de las partículas tengan tamaño pasante de la malla estandarizada número 200 (o menor a $75 \mu\text{m}$ de diámetro); el objetivo es hallar el tiempo óptimo de liberación del mineral que se llegue al D60 con una molienda eficiente.



Figura 8. Liberación de la partícula de interés
Fuente: (Metso Process Technology, 2014)

Para lograrlo se realiza tres (3) moliendas con el molino del laboratorio, (ver Figura 9) el ensayo consiste en experimentar a diferentes tiempos, la primera de 2 minutos, al segunda de 4 minutos y la final de 6 minutos. Con los resultados de las moliendas se elaborará la curva granulométrica de tiempo versus tamaño de partícula para definir el D60.



Figura 9. Liberación de la partícula de interés

La preparación de la pulpa que va a ingresar al molino se pesa 500 gramos por cada molienda a realizar, y la cantidad de agua varía con relación a la concentración con la que se desea trabajar, en este caso, requerimos una concentración de la pulpa al 63%, para lograr

simular; los procesos en la planta de beneficio, por lo cual la cantidad de agua requerida es de 300 ml.

$$\% \text{ pulpa} = \frac{500 \text{ gr}}{500 \text{ gr} + 300 \text{ ml}} * 100 = 62.5 \% \approx \mathbf{63\%}$$

5.6.4 Ensayos de flotación

Una vez obtenido el tiempo optimo de molienda (D60), se procede a iniciar con los ensayos de flotación en las celdas SANZEAL, para simular el proceso de la planta de beneficio, para ello se cuenta con diferentes capacidades de celdas. En la celda de 1,5 litros se simula una flotación tipo Rougher, que es el punto de partida para lograr una mayor concentración del mineral.

Se elaborará ensayos para definir el pH, y encontrar la dosificación adecuada para continuar con los siguientes ensayos.

En la Figura 10, es el esquema base para realizar los primeras pruebas, por lo que para obtener un el concentrado es necesario realizar el proceso de flotación durante 5 min, esto va ser nuestro primer banco de flotación, luego para el segundo banco de flotación lo que queda en las celda se va a volver a dosificar y a flotar durante 4 min, y para nuestro tercer y último banco de flotación se agrega la dosificación predeterminada y se adhiere el aire durante 3 min para la obtención de una muestra denomina medio, esto se realiza con la finalidad de lograr algo similar a un barrido para que la muestra de relave salga lo más baja posible en porcentaje de cobre.

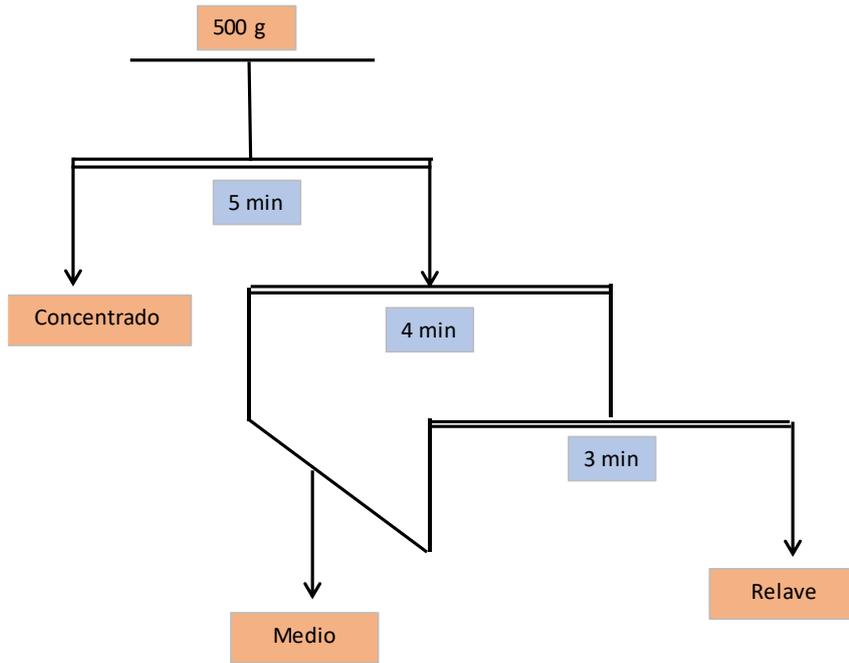


Figura 10. Esquema base de flotación

Concluido los ensayos iniciales, será necesario realizar una remolienda del mineral, con el propósito de lograr una mayor liberación del cobre y lograr aumentar su recuperación.

De la misma forma que se realiza en la etapa de molienda para encontrar el D60, en este caso el objetivo es el D80, es decir el 80% de pasante la malla estandarizada número 325 (o menor a 45 μm de diámetro). Para definir el D80 se debe realizar ensayos con diferentes tiempos de remolienda, los cuales son 4, 5 y 6 minutos, luego, se tamiza la descarga de la remolienda y como resultado se grafica la curva granulométrica.

Algo a destacar es que los tiempos de la remolienda pueden llegar a variar una vez se haya iniciado los ensayos, esto estará condicionado por los tiempos iniciales de la molienda.

Determinados todos los parámetros operativos, culminaremos los ensayos de flotación cuando nuestra recuperación de cobre sea mayor al 85%.



Figura 11. Ensayos de flotación



Figura 12. Espuma de concentrado de Cobre

5.6.5 Preparación de muestras

Completado cada uno de los ensayos de flotación será necesario preparar las muestras obtenidas para realizar los respectivos análisis químicos y obtener las leyes de cobre (Cu) y poder llevar un control de los parámetros operativos los cuales tienen que ser los adecuados para continuar con las pruebas.

Se inicia la etapa de preparación desde el filtrado y secado de las muestras, esto lleva alrededor de 12 horas para conseguir un material completamente seco.

Para evitar la contaminación de muestras, se dispone de un mortero por cada muestra para su preparación, debido a las diferentes leyes que presenta cada una, además, se realiza una homogenización de la muestra y un cuarteo, para evitar el efecto pepita.

Se etiquetará conforme corresponde las muestras y si es el caso, se guardará una contra muestra.

Los concentrados de cobre conseguidos serán analizados mediante el análisis de titulación, por el porcentaje de ley más alto y los relaves serán leídos por el método de absorción atómica.



Figura 13. Pesado de las muestras

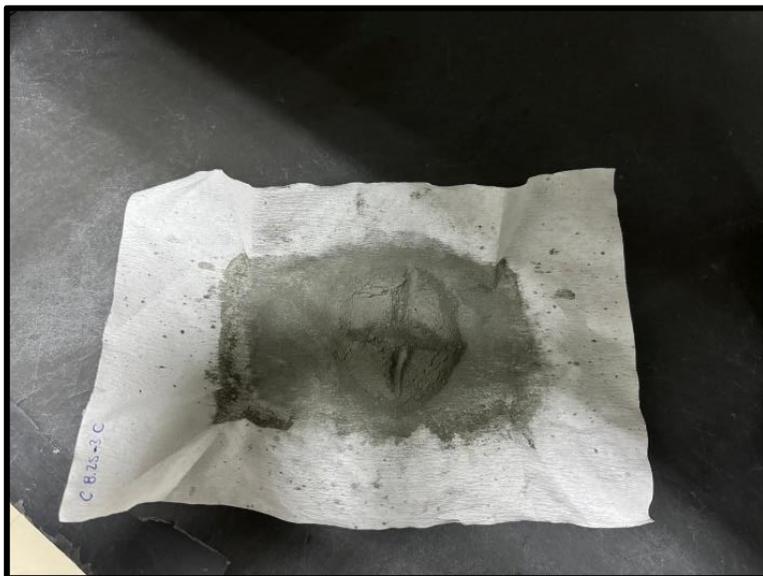


Figura 14. Homogenización y cuarteo de concentrados y medios



Figura 15. Homogenización y cuarteo de relaves



Figura 16. Análisis químico de las muestras

5.6.6 Elaboración de informe

Los balances metalúrgicos se elaborarán con los resultados de los análisis químicos y los pesos de los productos de la flotación, luego, se desarrollará un reporte para definir cuáles son los mejores parámetros operativos que se estén evaluando al momento de realizar la prueba.

6. Resultados

Los resultados preliminares de la mena mostraron que el material ensayado tiene una ley de cabeza de 0.52 % de Cu y de 2.17% de S.

A pesar de ser el mineral de interés para la extracción el cobre es importante destacar que el análisis de azufre (S) sirve para evaluar la eficiencia de la separación en los ensayos de laboratorio, ya que este elemento influye en la capacidad de separación de los minerales valiosos de las gangas, durante el proceso de la flotación.

6.1 Tiempos óptimos de molienda

Realizadas las moliendas para encontrar el tiempo de molienda se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2 Resultados de tiempo de molienda

Tiempo			
min	s	+ 200 ϕ	- 200 ϕ
0	0	83,68	16,32
2	120	43,16	56,84
4	240	39,67	60,33
6	360	22,36	77,64

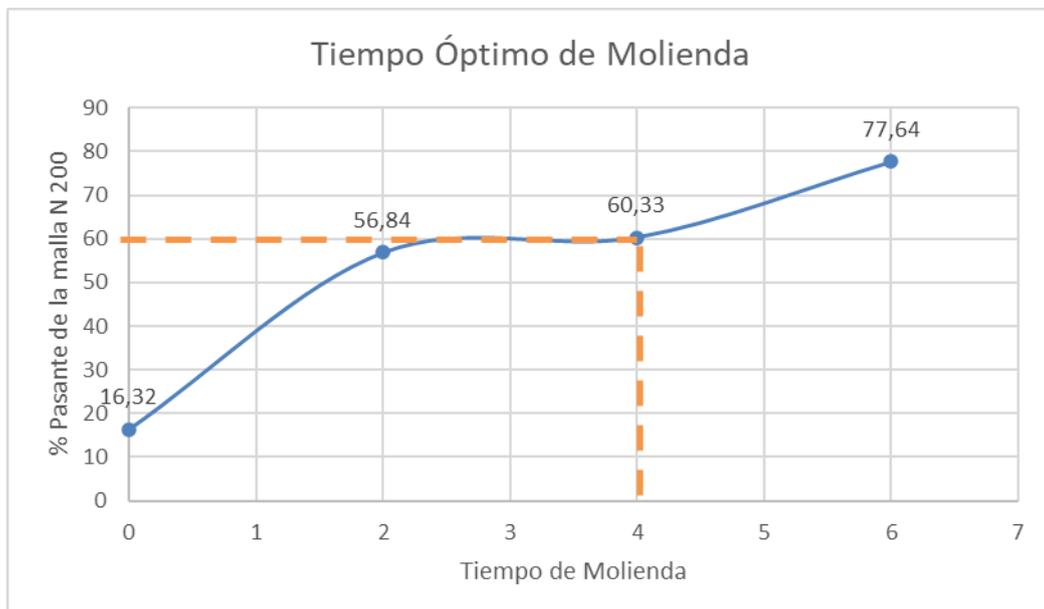


Figura 17. Curva granulométrica de molienda D60

Como se puede observar en la Figura 17, nuestro D60 coincide exactamente a los 4 minutos por lo que el tiempo óptimo de molienda para una correcta liberación de la partícula de cobre es de 4 minutos.

6.2 Tiempos óptimos de molienda

Una vez obtenido el tiempo de molienda se procedió hacer una flotación con una dosificación estándar para comprobar y determinar donde se puede optimizar el proceso para aumentar la ley de cobre. Los resultados del ensayo fueron:

Tabla 3 Flotación con dosificación de estándar

C 827 - 0						
Muestra	Peso	X	% Cu	% S	£ Cu	£ S
Concentrado	35,43	7,52	5,628	23,22	80,63	78,66
Medio	15,51	3,29	1,3538	6,956	8,49	10,32
Relave	420,4	89,19	0,064	0,2742	10,88	11,02
Total	471,34	100	0,5247	2,2189	100	100

Simplemente con la una óptima liberación del mineral mediante la molienda se ha podido elevar la concentración del cobre a 5.63% y con una recuperación del 80.63%. Sin embargo, es necesario seguir experimentando para lograr los objetivos propuestos por lo que se determinó que es necesario elaborar dos pruebas más para lograr una optimización del proceso, centrándonos en el pH y en la dosificación de reactivos.

6.2.1 Ensayos de pH

En el mercado existe diferentes tipos de modificadores para el pH, dependiendo si la necesidad es aumentar o disminuir la alcalinidad o acides de la pulpa. Para nuestro caso de investigación se trabaja con pulpas que varían de 7 a 9 y dependiendo del mineral a flotar es necesario ajustar este pH para lograr una buena recuperación. Para lograr modificar el pH se utilizó el óxido de calcio con el objetivo de elevar la alcalinidad y mejorar el entorno para una flotación de minerales sulfurados.

Se realizo tres ensayos de Cal para poder ver las variables y las modificaciones en el pH.

a) Primer ensayo

pH	9,19
CAL	0,15g

Tabla 4 Primer ensayo de dosificación de Cal

C 826 - 1						
Muestra	Peso	\bar{X}	% Cu	% S	ε Cu	ε S
Concentrado	40,08	8,54	6,253	27,06	89,96	92,10
Medio	16,89	3,60	0,7236	2,868	4,39	4,11
Relave	412,19	87,86	0,0382	0,1083	5,65	3,79
Total	469,16	100	0,5938	2,5101	100	100

b) Segundo ensayo

pH	10,27
CAL	0,30 g

Tabla 5 Segundo ensayo de dosificación de Cal

C 826 - 2						
Muestra	Peso	\bar{X}	% Cu	% S	ε Cu	ε S
Concentrado	40,85	8,69	5,885	25,23	91,31	91,44
Medio	16,23	3,45	0,4979	2,38	3,07	3,43
Relave	413,09	87,86	0,0358	0,14	5,62	5,13
Total	470,17	100	0,5600	2,3972	100	100

c) Tercer ensayo

pH	11,18
CAL	0,50g

Tabla 6 Tercer ensayo de dosificación de Cal

C 826 - 3						
Muestra	Peso	\bar{X}	% Cu	% S	ε Cu	ε S
Concentrado	40,16	8,57	5,683	24,52	90,99	90,71
Medio	17,28	3,69	0,4256	3,22	2,93	5,13
Relave	411,01	87,74	0,0371	0,11	6,08	4,16
Total	468,45	100	0,5355	2,3174	100	100

Es importante recalcar que un pH adecuado permite una flotación eficiente del cobre mientras minimiza la flotación de ganga y otros minerales indeseables, optimizando así la

recuperación y la calidad del concentrado de cobre, como se ha demostrado en las diferentes pruebas hechas.

En base a esta evidencia se demostró que los resultados más apropiados se dieron en el segundo ensayo donde incluso presenta una mayor recuperación de Cu.

Por lo tanto, la cantidad de Cal para mejorar el proceso es de 0.30g en 500g de muestra, esto aumentara la recuperación de Cu y al llevar un control de la cantidad exacta de cal que se necesita puede disminuir los costos por el exceso de consumo de este modificador de pH, logrando optimizar el proceso.

6.2.2 Ensayos de dosificación

Para la realización de los ensayos de dosificación al igual que la cal fue necesario realizar tres ensayos para lograr una comparación de los parámetros, donde se modificó el colector (xantato) y el espumante (F501).

a) Primer ensayo

Xantato	2 ml
F501	3 D

Tabla 7 Primer ensayo de dosificación de colector y espumante

C 827 - 1						
Muestra	Peso	X	% Cu	% S	£ Cu	£ S
Concentrado	40,04	8,47	6,04	26,18	92,25	90,07
Medio	13,63	2,88	0,496	3,823	2,58	4,48
Relave	419,31	88,65	0,0323	0,1512	5,17	5,45
Total	472,98	100	0,5542	2,4605	100	100

b) Segundo ensayo

Xantato	3 ml
F501	2 D

Tabla 8 Segundo ensayo de dosificación de colector y espumante

C 827 - 2						
Muestra	Peso	X	% Cu	% S	£ Cu	£ S
Concentrado	35,39	7,56	6,902	29,95	91,33	90,77
Medio	16,49	3,52	0,5378	3,672	3,32	5,19
Relave	416,1	88,91	0,0344	0,1135	5,35	4,04
Total	467,98	100	0,5715	2,4952	100	100

a) Tercer ensayo

Xantato	4 ml
F501	3 D

Tabla 9 Tercer ensayo de dosificación de colector y espumante

C 827 - 3						
Muestra	Peso	\bar{x}	% Cu	% S	ϵ Cu	ϵ S
Concentrado	40,06	8,47	5,884	25,04	92,62	92,61
Medio	15,62	3,30	0,4244	2,02	2,60	2,91
Relave	417,31	88,23	0,0291	0,1161	4,77	4,47
Total	472,99	100	0,5380	2,2899	100	100

En todos los casos la dosificación ha sido la adecuada, esto se puede evidenciar con los altos porcentajes de recuperación de cobre en los tres ensayos, debido a llevar un control adecuado del pH.

En base a los resultados obtenidos se puede proseguir con cualquier de las dosificaciones propuestas, sin embargo, sobresale el ensayo número dos, ya que presente una recuperación mayor al 91% y la ley más alta de concentrado de cobre.

6.2.3 Ensayos de remolienda

Para culminar las pruebas de flotación y lograr simular correctamente el circuito propuesto en la planta de beneficio es necesario obtener una mayor liberación de la partícula de cobre, con el objetivo de elevar su concentración, por lo que a partir de este punto las pruebas se basan en encontrar el D80, esto quiere decir que el 80% del material debe pasar por la malla 325 (45 μ m), por lo que se realizó 3 ensayos de remolienda con los tiempos de 3, 6 y 9 minutos, considerando los parámetros adecuados obtenidos en los ensayos anteriores.

Tabla 10 Tiempos de remolienda

Tiempo			
min	s	+325 ϕ	- 325 ϕ
2,3	138	19,90	80,10
3	180	16,26	83,74
6	360	6,84	93,16
9	540	3,94	96,06

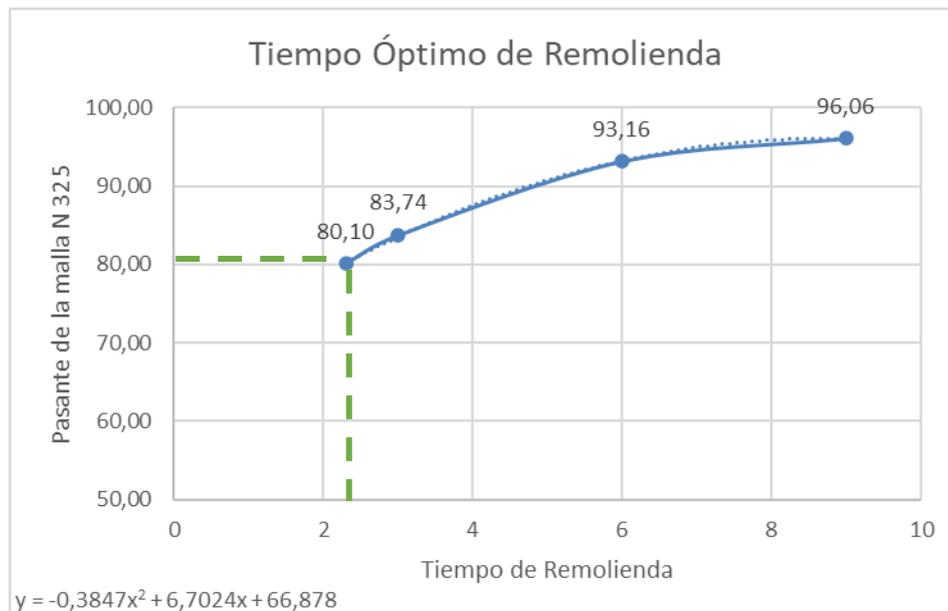


Figura 18. Curva granulométrica de remolienda D80%

Para lograrlo fue necesario realizar la remolienda juntando el concentrado con el medio, con el objetivo de tener un mayor volumen y porcentaje de Cu para su liberación, por lo que fue necesario preparar 3 pruebas con los parámetros adecuados obtenidos para su posterior ensayo de remolienda.

No obstante, los tiempos de remolienda propuestos no fueron los adecuados como se puede observar en la Figura 18 ya que en todos los casos se evidencia una obtención del mineral demasiado fino, por lo que el tiempo adecuado para la remolienda se lo determino mediante la ecuación de la curva granulométrica.

6.2.4 Flotación final

Finalmente, para dar por concluido los ensayos y poder dar por finalizado el circuito de flotación, es necesario realizar una prueba con todos los parámetros obtenidos, para este efecto, se aplicó las optimizaciones alcanzadas en cada uno de los ensayos previos, ya con el tiempo optimo de molienda, ensayos de modificador de pH la dosificación adecuada, y para concluir el tiempo de remolienda.

En este último ensayo se intenta simular todas las etapas de la flotación, como se puede apreciar en la Figura 19 donde tenemos 3 bancos de flotación con dos productos, el relave grueso que es nuestro desecho y va a ser el producto que termine en la relavera y el concentrado grueso de cobre, teniendo este denominativo por lo que aún necesita ser liberado más la partícula de cobre, este primer banco de flotación se lo conoce como flotación Rougher.

Como el concentrado grueso de cobre necesita una mayor liberación de la partícula, pasa a una etapa de remolienda, una vez obtenido la partícula más fina, este concentrado se deposita en el segundo banco de flotación, conocido como flotación Cleaner, al igual que la Rougher, este banco cuenta con tres celdas de flotación para lograr una mayor concentración del porcentaje de cobre, esta etapa se la puede considerar como la etapa final, ya que de estas celdas se obtiene como resultado el concentrado de cobre con mayor ley o porcentaje, sin embargo, existe una última etapa conocida como flotación de barrido o Scavenger, que como su nombre mismo lo indica es un barrido para lograr una mayor limpieza de los relaves, disminuyendo la pérdida de Cu. Es importante mencionar que tanto los medios 1,2 y 3 y el resultado final de la flotación de barrido que se posee el nombre de relave de concentrado (relave 2) tiene que recircularse al circuito de flotación, ya que estos productos aún tienen porcentajes de cobre considerables como se puede ver la Tabla 11.

A continuación, se muestran los resultados de la flotación final donde se ha logrado obtener una recuperación del **85.12%** de Cu con una ley superior al **24%**

Tabla 11 Resultados de flotación final

C 827 - 1						
Muestra	Peso	X	% Cu	% S	£ Cu	£ S
Concentrado	9,5	1,94	24,7489	35,4418	85,12	38,50
Medio 3	4,5	0,92	3,6954	31,6267	6,02	16,27
Medio 2	4,2	0,86	1,2055	27,8271	1,83	13,36
Medio 1	1,2	0,24	1,1921	10,5387	0,52	1,45
Relave 2	22,22	4,53	0,1061	10,0533	0,85	25,54
Relave 1	448,59	91,51	0,0349	0,1374	5,67	7,05
Total	490,21	100	0,5635	1,7839	100	100

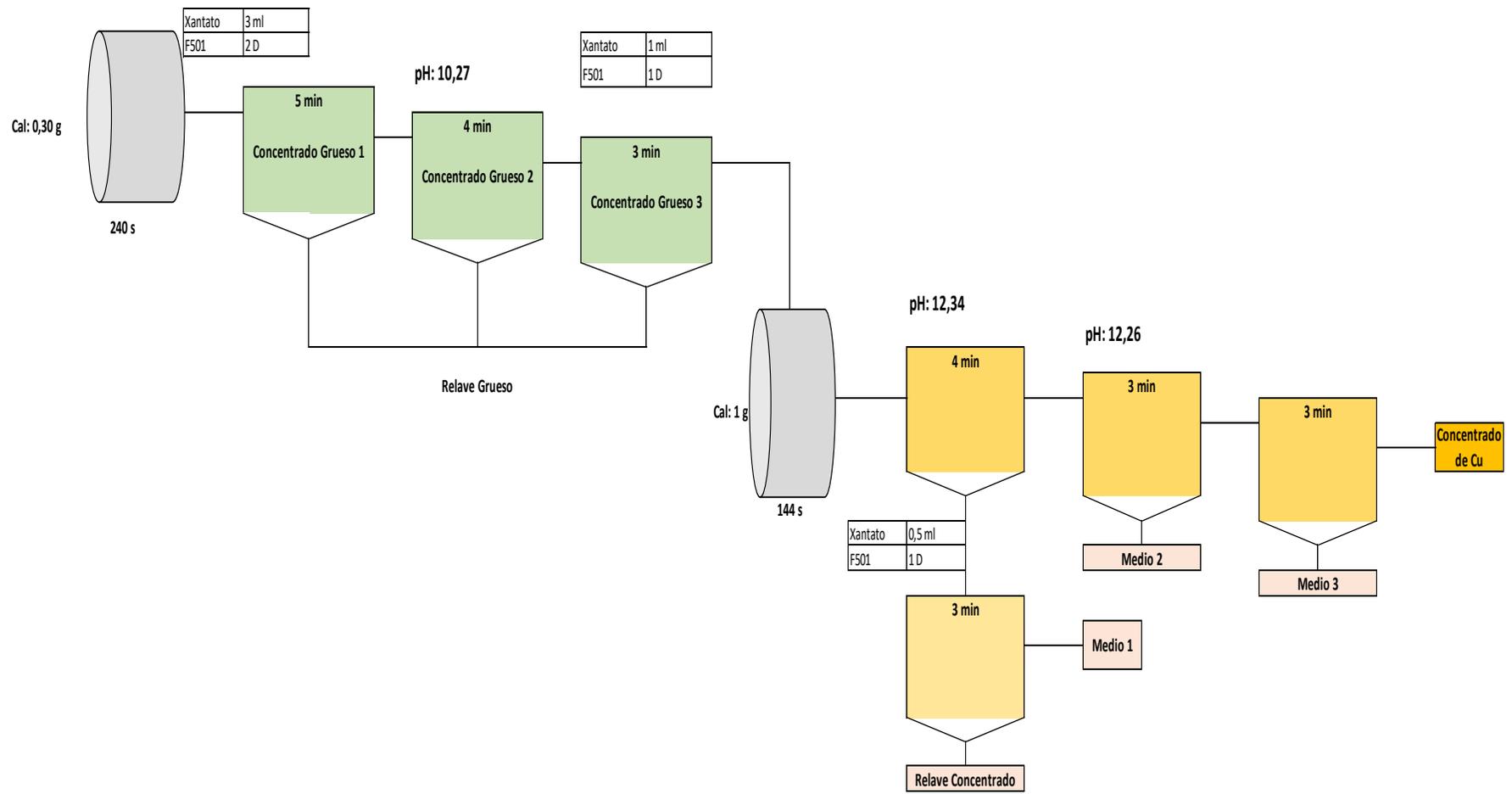


Figura 19. Diagrama de Flujo de Flotación Final

7. Discusión

El proceso de flotación está controlado por varios factores operacionales como son: los tiempos de molienda, los modificadores de pH y la dosificación de reactivos.

Estos factores afectan la eficiencia de la flotación y por lo tanto en la calidad del concentrado de cobre obtenido.

Según algunos autores como Nunes, Silva, & Ferreira, en su estudio nombrado “La influencia de la molienda en el comportamiento de flotación de minerales sulfurados” en el 2019 realizaron estudios en donde la eficiencia de la flotación se vio afectada por los tiempos de molienda. Los tiempos de molienda influyen directamente en la superficie de la partícula para la adsorción de los reactivos de flotación.

Si los tiempos de molienda son demasiados cortos, puede llevar a una menor eficiencia en la flotación ya que los minerales valiosos pueden no estar completamente liberados. Mientras que un tiempo de molienda excesivo puede llevar a la sobremolienda, generando partículas demasiado finas (lamas) que dificultan la flotación. En su trabajo han utilizado tiempos que van desde los pocos minutos (1 a 10) e incluso han llegado a realizar pruebas de más de dos horas de molienda, por lo que, en términos generales, los estudios de Nunes, Silva y Ferreira han demostrado que, conforme aumenta el tiempo de molienda, el tamaño de las partículas tiende a disminuir, lo que puede aumentar la superficie específica del material. Sin embargo, también señalan que después de cierto tiempo, los beneficios de continuar con la molienda disminuyen y podrían empezar a haber efectos adversos, como la ya mencionada sobremolienda.

En nuestro caso de estudio se realizaron 3 pruebas de molienda con diferentes tiempos siendo estos tiempos considerados por estos autores como de pocos minutos ya que fueron de 2,4 y 6 minutos y mediante la gráfica de una curva granulométrica se determinó el tiempo óptimo para la liberación de la partícula de cobre, corroborando los estudios de Nunes, Silva y Ferreira, que a mas tiempo de molienda la partícula aumenta su liberación pero generando mayor cantidad de lamas, por lo que se recalca la importancia de encontrar el tiempo optimo de liberación del mineral, siendo este el primer paso para mejorar la optimización del proceso de flotación.

El segundo paso para lograr la optimización es llevar un control del pH de la pulpa. En base a las pruebas realizadas por Boutin, Berthier, & Tremblay, en el 2020, en su obra “El efecto

de la dosificación de modificadores de pH en flotaciones de minerales sulfurados” se centra en entender cómo la variabilidad del pH puede afectar los procesos de flotación y concluyeron que un pH adecuado es esencial para mejorar la eficiencia de la flotación de minerales sulfurados, ya que influye en la carga superficial de las partículas, lo que afecta la interacción entre los reactivos de flotación y los minerales.

La investigación se centra en cómo el pH influye en la flotación de minerales sulfurados, que son clave en la extracción de metales como el cobre, el zinc y el plomo. Los minerales sulfurados como la pirita y la calcopirita tienen una superficie que puede ser modificada por el pH, de manera que en la investigación propuesta por Boutin, Berthier, & Tremblay explora cómo el pH de la flotación afecta el comportamiento superficial de los minerales sulfurados y su capacidad para formar burbujas estables, en su estudio el pH de las pulpas se modificó usando ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual se utiliza comúnmente para bajar el pH de la pulpa. El ácido sulfúrico actúa reduciendo la alcalinidad y haciendo que el medio se vuelva más ácido, no obstante, en nuestro caso de estudio trabajamos con pulpas ácidas por lo que fue necesario un modificador que nos ayude a subir el pH para trabajar en un medio más alcalino, de forma que en relación de costo - beneficio el modificador elegido fue el óxido de calcio, (cal). La cual actúa aumentando la alcalinidad de la pulpa para mejorar la hidrofobicidad de los minerales sulfurados. Esto se puede evidenciar en nuestras pruebas de cal, ya que una vez definido la cantidad de cal necesaria, el proceso mejoró, dando como resultado una mayor recuperación de cobre.

En ambos trabajos de investigación el objetivo fue el mismo, lograr una espuma estable mediante un control adecuado del pH de la pulpa, sin importar el tipo de modificador que se utilice o ya sea que se trabaje en medios alcalinos o ácidos, por lo que en base a nuestras pruebas se puede corroborar lo propuesto por Boutin, Berthier, & Tremblay que un pH controlado puede dar como resultado un circuito de flotación más estable y con mejores resultados.

Finalmente, autores como Huang, Li, & Wang, en el 2021, en su investigación nombrada “Optimización de la dosificación de reactivos de flotación para mejorar la selectividad y recuperación en la flotación de sulfuro”. Exploran que la dosificación de reactivos debe ser optimizada para evitar sobredosificación, que puede llevar a un alto consumo de reactivos y la formación de espuma excesiva, aumentando los costos de producción, por el otro lado, también se puede generar una subdosificación que puede resultar en baja recuperación del mineral. Lo planteado por estos autores se puede comprobar en las 3 pruebas con diferentes dosificaciones

realizadas para la presente investigación, los resultados demuestran un cambio en las recuperaciones del mineral en base a la cantidad de reactivos consumidos.

De acuerdo con los autores antes mencionados, y con los resultados obtenidos al finalizar todos nuestros ensayos se puede dar como optimizado el proceso de flotación ya que se ha logrado corroborar los estudios propuestos por diferentes autores en el presente trabajo de investigación, utilizando un enfoque mixto ya que fue necesario utilizar metodologías cualitativas y cuantitativas en cada una de los ensayos y para la interpretación de los resultados, por lo tanto los métodos utilizados fueron los adecuados para lograr los objetivos planteados. También podemos confirmar lo propuesto en la hipótesis que al tener una partícula más fina tenemos como resultado una ley de concentrado más alta.

8. Conclusiones

- En la caracterización mineralógica del pórfido de cobre determina que contiene un 1,5% de pirita, 1,2% de calcopirita; y en los ensayos químicos de la ley de cabeza tenemos un 0.5240 % de Cu y de 2.17% de S.
- Se ha cumplido con el primer objetivo ya el tiempo óptimo de molienda para una correcta liberación de la partícula en la mena del pórfido de cobre es de 4 min o 240 segundos.
- Para cumplir con el segundo objetivo fue necesario considerar los resultados de las pruebas de flotación ya que son la base para definir la dosificación final. Por lo tanto, la cantidad de Cal para optimizar el proceso fue de 0.30g. Dando como resultados una ley de 5.885% de Cu obteniendo una recuperación del 91.31% y para las pruebas de dosificación se fue variando la cantidad de reactivos utilizados que fueron el colector y espumante (xantato y F501 respectivamente). En todos los casos la dosificación ha sido la adecuada, esto se puede evidenciar con los altos porcentajes de recuperación de cobre en los tres ensayos. Sin embargo, sobresale el ensayo número dos, ya que, en una muestra de 500 g, el concentrado de cobre pesó 35.39 g y una ley de 6.902% de Cu dando una recuperación de 91.33%.
- Concluidos los ensayos para optimizar el proceso, y cumpliendo con el tercer objetivo se procedió a realizar una prueba con todas las variables operativas encontradas en los ensayos, dando resultados muy favorables, ya que en una muestra de 500 g se consiguió una ley de 24.75 % Cu, con una recuperación del 85.12%. Por esta razón podemos concluir que los ensayos para establecer y optimizar un circuito de flotación fueron un éxito.
- En todos los ensayos realizados, se llevó un control del azufre (S), como elemento que nos sirve para evaluar la eficiencia de la separación en los ensayos, este elemento puede influir en la capacidad de separación de los minerales valiosos durante la flotación.
- El porcentaje de azufre permite evaluar si el proceso de flotación está seleccionando adecuadamente los minerales de interés que para nuestro caso es el Cu y rechazando las impurezas sulfurosas como la pirita (FeS₂).

9. Recomendaciones

- Como el yacimiento es demasiado heterogéneo, en el stock pile o pila de acopio se recomienda realizar un registro de transporte del mineral que llega con sus respectivas litologías para permitir tener un mayor control y al momento que ingresa a las celdas de flotación tener la dosificación adecuada de los reactivos para dichas litologías.
- Utilizar un análisis granulométrico durante y después del proceso de molienda para verificar el tamaño de la partícula.
- Realiza mediciones regulares del pH en la pulpa para asegurarte de que se mantiene en el rango adecuado para la flotación.
- La cal debe añadirse de forma gradual para ajustar el pH sin causarle un cambio brusco a la pulpa.
- Realiza estudios previos para determinar la dosificación ideal de cal según las características del mineral que se está flotando.
- Asegúrate de que la cal se disuelva bien en la pulpa y no forme grumos que puedan alterar la flotación
- Los colectores y espumantes deben ser seleccionados en función de las propiedades superficiales del mineral que se desea recuperar
- La cantidad de espumante debe ajustarse para generar una espuma estable que permita la concentración efectiva de mineral sin crear una espuma excesiva.
- Tratar de replicar las condiciones industriales tanto como sea posible (concentración de la pulpa, temperatura, calidad del agua, etc.)
- Tiempo de adsorción de los reactivos sea el correcto para se adhieran a las partículas del mineral y modifiquen sus propiedades para facilitar la separación.
- Según la normativa internacional para la exportación de concentrado de Cu, el azufre es un elemento penalizado en el concentrado, por lo que este debe estar entre los rangos de 27% a 31%.

10. Referencia bibliográfica

- Alulima, J., & Vega, G. (2021). Caracterización mineralógica y análisis del grado de liberación de los minerales de cobre-molibdeno de la mina Mirador. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Araujo, J., Lima, A., & Silva, F. (2014). Estudio de la flotación de minerales de cobre en condiciones operativas variables. *Journal of Mineral Processing*, 223-234.
- Banco Central del Ecuador. (2021). Reporte de Minería. Resultados al tercer trimestre de 2020. Banco Central Del Ecuador (BCE).
- Bise, C. J. (2003). Mining engineering analysis. Littleton: PYME.
- Boutin, P., Berthier, J., & Tremblay, R. (2020). Effect of lime dosage on the flotation of sulfide minerals.
- CODELCO. (2019). Flotación " Burbujas de cobre". Chile: Codelco.
- Conejos Trujillo, V. (2003). Procesamiento de minerales. Antofagasta: Universidad Católica del Norte.
- CYTEC. (2008). Procesamiento de minerales, perfil del programa. Cytec Industries Inc.
- Gaudin, A. M. (1957). Principles of Mineral Dressing. New York: McGraw-Hill.
- Gendall, I. R., Quevedo, L. A., Sillitoe, R. H., Spencer, R. M., Puente, C. O., León, J. P., & Povedo, R. R. (1995). Discovery of a Jurassic Porphyry Copper Belt, Pangui Area, Southern Ecuador. *SEG Newsletter*, 7-15.
- Huang, X., Li, Z., & Wang, W. (2021). Optimization of flotation reagent dosage for improving the selectivity and recovery in sulfide flotation. *International Journal of Mining*.
- Jakaitè, L. (2020). QAPF. Obtenido de GABBROIC AND ULTRAMAFIC ROCK CLASSIFICATION : <https://strike-dip.com/>
- Jinshibao. (2016). Cono Xmq fresadora bolas de molienda de mineral de pequeño . Obtenido de Shicheng Pioneers Mining Machinery Manufacturer Factory. .
- Jones, M., & Spottiswood, D. J. (2004). Principles of Mineral Flotation. Elsevier.
- Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1990). Introducción al procesamiento de minerales. Mexico: Limusa.
- Metso Process Technology. (2014). Flotación 1 - Fundamentos. Obtenido de <https://learn.edumine.com/store/629826-flotation-1-fundamentals>

Nunes, D., Silva, D., & Ferreira, L. (2019). La influencia de la molienda en el comportamiento de flotación de minerales sulfurados. *Revista de Minería*.

Renasa. (2020). *Informacion Técnica* . Reactivos Nacionales S.A.

Yoon, R. H., & Luttrell, G. H. (2005). *Flotation Science and Engineering*. Springer.

Zamora, J. A. (s.f.). *Química Industrial*. Obtenido de <https://blogceta.zaragoza.unam.mx/quimicaindustrial/unidad-11/ou25/>

11. Anexos

Anexo #1. Registro Fotográfico de los Equipos Empleados



Figura 20. Celdas SANZEAL



Figura 21. Pulverizadora de tres cabezas



Figura 22. Mortero de porcelana



Figura 23. Horno Industrial tipo Labtech Hebro



Figura 24. Filtros prensa para Laboratorio

ECSA 质计中心
CENTRO DE CALIDAD Y MEDICION ECSA

滴定分析测定记录

Número de lote _____

REGISTRO DE MEDICION DE ANALISIS DE TITULACION

Fecha de prueba _____ dia noche ; Elemento de prueba X ⇌ _____

Nombre de la solución estandar _____ ; Concentración (C) o título de titulación (F) 0.003146

No	Número de muestra	Nombre de la muestra	La cantidad de muestra, (m) g	Volumen inicial (V _i) mL	Volumen Final (V _f) mL	Consumo actual (V) mL	Cálculo de resultado %	Informe de resultado %	Consumo actual de blanco
1		CB27-0 Concentrado	0.3063			5.48	5.628		V ₀ =
2		-1 "	0.3016			5.79	6.040		
3		-2 "	0.3054			6.70	6.902		
4		-3 "	0.3021			5.65	5.884		

Fórmula de cálculo: $X(\%) = \frac{F \cdot (V - V_0)}{m} \times 100$

Los significados de letras en la fórmula: V=V_f-V_i

Inspector: _____ Revisor: _____

CENTRO DE CALIDAD Y MEDICION ECSA
 滴定分析测定记录
 REGISTRO DE MEDICION DE ANALISIS DE TITULACION

Número de lote _____

Fecha de prueba _____ ; día noche ; Elemento de prueba X⇒

Nombre de la solución estándar _____ ; Concentración (C) o título de titulación (F) 000-1136

No	Número de muestra	Nombre de la muestra	La cantidad de muestra, (m) g	Volumen Inicial, (V ₁) mL	Volumen Final (V ₂) mL	Consumo actual (V) mL	Cálculo de resultado %	Informe de resultado %	Consumo actual de blanco
		CB26-1 Concentrado	0.1063			25.32	27.06		V ₀ =
		Medio	0.1022			2.50	2.868		
		Rebve	0.5034			0.40	0.1083		
		CB26-2 C	0.1030			22.88	25.23		
		M	0.1007			2.28	2.383		
		R	0.5045			0.60	0.1351		
		CB26-3 C	0.1061			22.90	24.52		
		M	0.1085			3.08	3.225		
		R	0.5036			0.50	0.1128		

Fórmula de cálculo: $X(\%) = \frac{F \cdot (v - v_0)}{m} \times 100$

(Los significados de letras en la formula: v=v₂-v₁)

Inspector: _____

Revisor: _____

Anexo #3. Certificado de traducción

CERTIFICADO

Loja, 07 de enero del 2024

Yo, Lilibeth Johana Bravo Fajardo, con documento de identidad Nro. **2100510854**, poseedora del certificado **NIVEL INTERMEDIO AVANZADO B2-INGLÉS**, avalado por Cambridge Assessment English, Número de Verificación: C0018683.

CERTIFICO:

Que el documento aquí compuesto es fiel a la traducción del idioma Español al idioma Inglés de un resumen de Tesis de Posgrado, la misma que se realizó en base a los documentos originales entregados por el autor, el ingeniero **CRISTIAN ANDRÉS LUDEÑA GUAMÁN** con cédula de identidad Nro. **1103993760**, con el tema denominado "Desarrollo y optimización del proceso de flotación para minerales de sulfuros de cobre obtenidos en la cordillera del Condor, en las coordenadas, latitud: 9604245 y longitud: 784884, provincia de Zamora Chinchipe".

Lo certifico en honor a la verdad, y, a su vez autorizo a el interesado a hacer uso del presente documento para los fines que considere pertinentes.

Atentamente,



Ing. Lilibeth Bravo Fajardo

C.I: 2100510854



lili06.fajardo@gmail.com
Cell: 098 806 3108