



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

“Recuperación metalúrgica de minerales en la relavera de San
Bartolomé mediante flotación selectiva”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

DEIBY CHAYANE MORA ORDÓÑEZ

JUAN PABLO REIBAN PATIÑO

Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA, ECUADOR

2024

Deiby Chayane Mora Ordóñez

Juan Pablo Reiban Patiño

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Junio, 2024

**“Recuperación metalúrgica de minerales en la relavera de San
Bartolomé mediante flotación selectiva”**

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis padres Jaime y Casilda, porque son mi razón de vivir, gracias a ellos he logrado llegar a estas instancias de mi vida, y su apoyo incondicional ha sido mi fortaleza para esforzarme cada día y luchar por mis sueños sin importar los obstáculos que se me presenten.

A mis hermanos Samantha, Mario, Daniela, Emili y Amanda porque me apoyaron en cada etapa de mi formación académica y gracias a ellos encontré la motivación para saber que a pesar de las dificultades siempre podré salir adelante.

A mi tía Flor, mi segunda mamá, y a mi tía Graciela, quienes me acompañaron en este proceso desde el comienzo hasta el final ya que sin dudarlo siempre encontraban la forma de apoyarme y me demostraban lo lejos que se puede llegar con esfuerzo y dedicación.

También, a mis abuelitos Ofelia y Miguel a quienes tanto quiero, por brindarme sus consejos y ser el mejor ejemplo de vida que puedo tener.

Y por lo que hemos vivido, a mis mejores amigos Francisco, Juan Pablo, Guido y Verónica, porque su presencia en mi vida fue fundamental para que esta etapa fuera una de las más bellas que puedo llegar a tener.

Deiby Chayane Mora Ordóñez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a una persona a quien quiero y admiro profundamente, mi hermana Anita María Reiban Patiño. Su constante consejo y apoyo a lo largo de este viaje académico han sido invaluable, compartiéndome su sabiduría y siendo un ejemplo a seguir en lo que aspiro llegar a ser y lograr en la vida. Su amor y orientación han sido fundamentales en mi crecimiento personal, y le estoy eternamente agradecido por estar siempre a mi lado y ser una luz en mi camino.

A mi mamá, Ana María, quien ha sido el pilar de amor y apoyo incondicional en las buenas y en las malas. Su sacrificio y entrega han sido un faro de inspiración en mi vida, y su amor ha sido la fuerza que me impulsa a alcanzar mis sueños. También a mi papá, Wilson, cuya dedicación y ejemplo de perseverancia han sido una guía constante en mi camino académico y personal. A ambos, les agradezco desde lo más profundo de mi corazón por su amor, paciencia y sacrificio para ayudarme a alcanzar mis sueños.

A mis amigos, por ser el apoyo y refugio que día a día me sacan una sonrisa. Su compañía a lo largo de mi vida ha sido un regalo invaluable, motivándome a cumplir mis sueños y aspiraciones.

Finalmente, con un profundo cariño y gratitud a mis queridas tías Zhanet y Sandra. Su presencia ha sido una luz constante en mi vida, brindándome amor, apoyo y sabios consejos en cada paso del camino. Su generosidad, sus historias y dedicación han dejado una huella imborrable en mi corazón, y les agradezco por estar siempre ahí para guiarme, alentarme en cada desafío y por inspirarme a ser una mejor persona.

Juan Pablo Reiban Patiño

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme vivir la enorme y feliz experiencia de mi formación académica. Luego quiero agradecer a la Universidad de Azuay, en especial a la docencia de la Escuela de Ingeniería en Minas por compartirme su conocimiento durante todos estos años.

También a nuestro tutor de tesis Ing. Fernando Valencia, por su confianza, tiempo y apoyo en toda la bonita experiencia de desarrollo de nuestro trabajo. También al Ing. Eduardo Luna, quien más allá de su rol como docente, sin dudarlo me supo apoyar en mis momentos de dificultades a lo largo de mi formación académica.

Agradezco a mi mejor amigo y compañero de tesis Juan Pablo, por haber confiado en mí y compartir esta grata experiencia que nos acerca hacia la vida profesional.

Y agradezco a todas las personas y amigos que me acompañaron y contribuyeron para que todo esto sea posible.

Deiby Chayane Mora Ordóñez

AGRADECIMIENTO

Quiero empezar expresando mi más profundo agradecimiento a mis padres, Wilson y Ana María. Han sido la luz que guía mi camino, los pilares que sostienen mis sueños. Gracias por enseñarme que el esfuerzo y la dedicación siempre traen su recompensa, y por ser el ejemplo vivo de perseverancia y amor incondicional. A mi hermana Anita, gracias por ser el ejemplo que siempre quiero alcanzar. Has estado a mi lado en cada decisión, has sido mi luz y un pilar de apoyo constante. Gracias por enseñarme lo que significa el amor sin límites, por apoyarme incondicionalmente y creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba.

A mi familia, agradezco el continuo apoyo y los sabios consejos que me han permitido crecer y formar mi carácter. Un agradecimiento especial a mis abuelos y tías Zhanet y Sandra, quienes siempre han estado allí para guiarme y criarme con su amor.

Quiero agradecer a mi segunda familia, la que he formado y aprendido a apreciar a lo largo de este camino. Gracias a todos mis amigos por estar conmigo, quererme en los momentos difíciles, ver en mí las cosas buenas que yo no puedo, y por enseñarme lo fácil que puede ser sentirse querido, lo que significa la verdadera amistad y que la vida es más llevadera con una sonrisa. Principalmente, gracias por ser un refugio para mí y enseñarme a apreciar cada pequeño momento y convertirlo en un gran recuerdo.

Gracias a Erika por su comprensión y apoyo; a Ariana por sus ánimos y afecto; a Sofía por su amistad; a Danny por su confianza y cariño; a Lizz por su incondicional comprensión; a Andrea por el cariño. A dos personas muy especiales que me han acompañado a lo largo de este proceso, a Aarón, por su apoyo constante y valiosa amistad a lo largo de los años. A Deyvid, por juntos dar un paso grande en la formación académica, por cada experiencia compartida y lección aprendida.

Por último, agradezco profundamente al Ing. Fernando Valencia y al Ing. Eduardo Luna por su invaluable guía y consejo, los cuales han dejado una huella significativa en mi formación personal y académica.

Juan Pablo Reiban Patiño

RESUMEN:

En la relavera de San Bartolomé se propuso una recuperación metalúrgica iniciando con la caracterización mineral, donde se identificaron sulfuros de interés como la pirita y la calcopirita. Para este proceso, se plantearon dos tipos de flotación: una colectiva y otra selectiva, utilizando diversos reactivos químicos. En la flotación colectiva, se emplearon reguladores de pH, específicamente hidróxido de sodio, así como colectores como el Xantato Amílico de Potasio Z-6, y espumantes, destacando el ER-370. En el caso de la flotación selectiva, se usaron los mismos reactivos químicos, añadiendo además un depresor, que fue el sulfato de cobre. Gracias a estos procedimientos y la adecuada selección de reactivos, se lograron resultados significativos en términos de eficiencia y selectividad. La recuperación global (R) alcanzada fue del 76.19%, lo que indica una alta eficiencia en la extracción de los minerales de interés. Asimismo, se obtuvo una razón de enriquecimiento (RE) de 6.98%, reflejando un buen nivel de concentración de los sulfuros valiosos en los productos finales. Estos resultados demuestran la efectividad del proceso de recuperación propuesto y sientan las bases para futuras optimizaciones en el tratamiento de relaves similares, subrayando la importancia de una correcta caracterización mineral y la selección adecuada de reactivos químicos en la flotación de sulfuros.

Palabras clave: Calcopirita, flotación de sulfuros, flotación selectiva, recuperación metalúrgica, relavera.

Ing. Fernando Valencia Guaricela
Director del trabajo de titulación

ABSTRACT:

In the San Bartolomé tailings facility, a metallurgical recovery process was proposed, starting with mineral characterization, where sulfides of interest such as pyrite and chalcopyrite were identified. For this process, two types of flotation were proposed: one collective and one selective, using various chemical reagents. In the collective flotation, pH regulators, specifically sodium hydroxide, as well as collectors such as Potassium Amyl Xanthate Z-6, and frothers, notably ER-370, were used. In the case of selective flotation, the same chemical reagents were used, adding a depressant, which was copper sulfate. Thanks to these procedures and the proper selection of reagents, significant results were achieved in terms of efficiency and selectivity. The overall recovery (R) achieved was 76.19%, indicating high efficiency in the extraction of the minerals of interest. Additionally, an enrichment ratio (Re) of 6.98% was obtained, reflecting a good level of concentration of valuable sulfides in the final products. These results demonstrate the effectiveness of the proposed recovery process and lay the foundation for future optimizations in the treatment of similar tailings, highlighting the importance of proper mineral characterization and the adequate selection of chemical reagents in sulfide flotation.

Keywords: Chalcopyrite, sulfide flotation, selective flotation, metallurgical recovery, tailings facility.

Ing. Fernando Valencia Guaricela
Thesis Director

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN:	viii
ABSTRACT:	ix
TABLA DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
INTRODUCCIÓN	1
1 CAPÍTULO I: Marco Teórico y Estado del Arte	3
1.1 Yacimientos Minerales	3
1.2 Sulfuros	5
1.3 Concentración de Minerales	6
1.3.1 Propiedades Diferenciales	7
1.4 Índices Metalúrgicos	8
1.4.1 Índices que se relacionan con calidad	8
1.4.2 Índices que Relacionan la Capacidad	10
1.4.3 Índices Metalúrgicos Ideales	10
1.5 Plantas de Beneficio	11
1.6 Relavera	11
1.7 Recuperación Metalúrgica en Relaveras	12
1.8 Flotación de Sulfuros	13

1.8.1	Flotación Colectiva	16
1.8.2	Flotación Selectiva	16
1.9	Reactivos de Flotación	16
1.9.1	Colectores.....	17
1.9.2	Modificadores	22
1.9.3	Espumantes	24
1.10	Análisis de Difracción por Rayos-x	25
1.11	Análisis de Absorción Atómica.....	26
2	CAPITULO II: Recuperación de Sulfuros en la Relavera	28
2.1	Antecedentes Generales	28
2.2	Geología Local.....	28
2.3	Mineralización	29
2.4	La Mina de San Bartolomé	30
2.5	La Relavera de San Bartolomé	30
2.6	Propuesta de Investigación	30
2.6.1	Visita Técnica	31
2.6.2	Topografía.....	33
2.6.3	Cálculo del Volumen	34
2.6.4	Obtención de Muestras.....	36
2.6.5	Caracterización Mineral.....	39
2.6.6	Propuesta de Flotación	40
2.6.7	Aplicación Metalúrgica.....	41

2.7	Protocolo de Flotación Colectiva.....	41
2.8	Preparación de la pulpa.....	42
2.8.1	Densidades	43
2.8.2	Potencial Hidrogeno (pH) de la muestra.....	45
2.8.3	Dosificación de reactivos químicos	47
2.8.4	Tiempo de acondicionamiento	50
2.8.5	Resultados	52
2.9	Protocolo de flotación selectiva.....	53
2.9.1	Preparación de la pulpa para la flotación selectiva	53
2.9.2	Dosificación de reactivos químicos para la flotación selectiva	55
2.9.3	Tiempo de acondicionamiento para la flotación selectiva	60
2.9.4	Resultados	60
3	CAPITULO III: Resultados, Conclusiones y Recomendaciones.....	62
3.1	Análisis de Resultados	62
3.2	Balance de Masas.....	62
3.3	Recuperación Mineral Alcanzada	64
3.4	Conclusiones.....	64
3.5	Recomendaciones	66
4	Bibliografía.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 <i>Esquema adhesión selectiva</i>	14
Figura 1.2 <i>Clasificación de los colectores</i>	17
Figura2.1 <i>Mapa de la geología regional</i>	29
Figura 2.2 <i>Relavera de San Bartolomé</i>	32
Figura 2.3 <i>Sedimentos en una fuente de agua cercana</i>	32
Figura 2.4 <i>Drenaje implementado en la laguna de la relavera</i>	33
Figura 2.5 <i>Ortofoto de la Relavera de San Bartolomé</i>	34
Figura 2.6 <i>Volumen de la relavera</i>	35
Figura 2.7 <i>Calculo del volumen de la relavera mediante el software RecMin</i> ...	36
Figura 2.8 <i>Puntos de la toma de muestra en la relavera</i>	37
Figura 2.9 <i>Extracción de muestras de la Relavera</i>	38
Figura 2.10 <i>Recolección total de la muestra</i>	39
Figura 2.11 <i>Diagrama de flujo propuesto para la flotación colectiva y selectiva</i>	41
Figura 2.12 <i>Cálculo de la densidad de la muestra</i>	43
Figura2.13 <i>Medición de pH de la muestra</i>	46
Figura 2.14 <i>Reactivos químicos</i>	47
Figura 2.15 <i>Adicionamiento del regulador de pH</i>	48
Figura 2.16 <i>Adicionamiento del colector</i>	49
Figura 2.17 <i>Adicionamiento del espumante</i>	50
Figura 2.18 <i>Concentrado</i>	51
Figura 2.19 <i>Secado de muestras</i>	52
Figura 2.20 <i>Reactivos químicos</i>	55
Figura 2.21 <i>Adicionamiento del regulador de pH</i>	56

Figura 2.22 Adicionamiento del sulfato de cobre	57
Figura 2.23 Adicionamiento del colector.....	58
Figura 2.24 Adicionamiento del espumante.....	59
Figura 2.25 Secado de muestras	60
Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de flotación.....	63
Figura 5.1 Difractograma de la muestra MI	71
Figura 5.2 Obtención de las muestras	71
Figura 5.3 Molienda de la muestra	72
Figura 5.4 Tamizaje de la muestra	72
Figura 5.5 Muestras resultantes de la flotación	73
Figura 5.6 Medición topográfica	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 <i>Procesos geológicos formadores de yacimientos minerales</i>	3
Tabla 1.2 <i>Grandes grupos de yacimientos minerales según su origen</i>	4
Tabla 1.3 <i>Propiedades Diferenciales aplicadas a distintos tipos de concentración</i>	7
Tabla 1.4 <i>Índices metalúrgicos ideales</i>	11
Tabla 2.1 <i>Análisis mineralógico de la muestra: M1</i>	40
Tabla 2.2 <i>Parámetros para la flotación colectiva</i>	42
Tabla 2.3 <i>Distribución del tiempo de acondicionamiento en la flotación colectiva de sulfuros</i>	51
Tabla 3.1 <i>Análisis mineralógico de las muestras: M1, M2 Y M3</i>	62
Tabla 3.2 <i>Balance de Masas y Tenores</i>	63

“RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE MINERALES EN LA RELAVERA DE SAN BARTOLOMÉ MEDIANTE FLOTACIÓN SELECTIVA”

INTRODUCCIÓN

San Bartolomé es una parroquia rural perteneciente al cantón Sígsig en la provincia del Azuay, en donde la empresa Armenonic operaba en la extracción de minerales metálicos hasta el año 1993, año en el cual la empresa se declaró en quiebra. A partir de este punto se abandonaron todas las instalaciones incluidas las relaveras dejando un pasivo ambiental muy grave en la zona. En ese entonces el único metal de interés de la mina era la plata, por lo tanto, no se consideraba el resto de los metales debido a la deficiente tecnología de la época junto con la poca asesoría recibida; los recursos de la mina no se supieron aprovechar de una manera óptima, por lo tanto, el contenido de los relaves es considerable, tanto en metales aprovechables como pesados, estos últimos teniendo un alto potencial contaminante.

Actualmente el depósito de relaves se encuentra en forma de sedimentos con una estructura similar a la de un pantano, que al estar estancados y descuidados por más de 20 años se han visto altamente expuestos a los principales factores atmosféricos como el agua, viento y las diferentes variaciones de temperatura, produciendo una dispersión química, provocando de manera periódica la descomposición físico-química de los residuos minerales, lo que ha facilitado los fenómenos de lixiviación y erosión, perjudicando principalmente a las fuentes de agua cercanas y al suelo.

La zona está sufriendo las consecuencias del mal manejo de los desechos mineros por lo que es necesario aplicar un estudio y caracterización del relave minero para determinar una alternativa de gestión de los minerales que este contiene, buscando

obtener un potencial de recuperación metalúrgico favorable que reduzca la presencia de metales en la relavera, de manera que, se evite generar más problemas al ecosistema y comunidad proporcionando una alternativa para reutilizar los minerales. Este estudio será enfocado en la flotación de minerales aplicando los conocimientos adquiridos y poniéndolos en práctica no solo desde el enfoque metalúrgico, sino también desde un enfoque técnico de los procesos y aplicación de las sustancias involucradas a lo largo de este proceso.

1 CAPÍTULO I: Marco Teórico y Estado del Arte

1.1 Yacimientos Minerales

Un yacimiento mineral también conocidos como depósitos minerales para Herrmann y Zappettini (2014) es: una acumulación producida de manera natural dentro de la corteza terrestre, producto de diversos cambios (físicos/químicos) y procesos geológicos en largos periodos de tiempo; con presencia de elementos químicos de interés con un grado de concentración variado según cada elemento (p.3), esta variable es de gran importancia ya que influye en las características y cualidades es de las rocas y los más importante define su viabilidad económica.

Estos pueden variar en su tamaño, forma, composición y ubicación, sin embargo Herrmann y Zappettini (2014) los clasifican en dos grandes grupos resaltando la importancia de los procesos a los cuales la roca está sometida a cambios, estos se clasifican en dos categorías principales: procesos endógenos, que ocurren dentro de la corteza terrestre, y procesos exógenos, que se producen fuera de la corteza terrestre.

Tabla 1.1
Procesos geológicos formadores de yacimientos minerales

PROCESOS GEOLÓGICOS	FORMADORES DE YACIMIENTOS	MINERALES	
Tipo de proceso	Descripción del proceso	Ejemplos de elementos que concentran	
Endógenos	Cristalización magmática	Precipitación de minerales de mena como constituyentes mayores o menores en rocas magmáticas.	Diamantes, tierras raras. Uranio, litio, estaño, cesio (en pegmatitas).
	Segregación magmática	Precipitación por cristalización fraccionada o inmiscibilidad líquida.	Cromo, cobre, níquel, titanio.
	Hidrotermal	Deposición a partir de soluciones acuosas calientes de origen magmático, metamórfico o meteórico.	Cobre, oro, molibdeno.
	Metamórfico	Neoformación de minerales por cambios en las condiciones de presión y temperatura.	Hierro, oro, níquel, cobre. Magnesio. Talco.
Exógenos	Exhalativos superficiales, volcanogénicos	Exhalaciones hidrotermales submarinas depositadas en fondo oceánico.	Plomo, zinc, plata. Azufre.
	Sedimentarios	Alóctonos (clásticos): deposición de minerales pesados.	R u t i l o , zircón, estaño, oro. Arenas.
		Autóctonos: precipitación química de minerales con o sin intervención de biota.	Hierro, manganeso, cobre. Fosfatos.

	Meteorización	Lixiviación de elementos solubles y formación de concentraciones de elementos insolubles (residuales). Precipitación de los elementos solubles <i>in situ</i> (concentración supergénica) o transportados a distancia de la fuente (exóticos).	Aluminio, níquel, cobre, oro, plata.
--	---------------	---	--------------------------------------

Nota. Tabla de los procesos geológicos formadores de yacimientos minerales. Tomado de Herrmann y Zappettini (2014).

También es importante resaltar que los procesos geológicos no es la única forma de clasificar a los yacimientos minerales por lo que Pearson, Prentice Hall, Inc. (2005) en su publicación llamada “The rock cycle” (como se citó en Herrmann y Zappettini, 2014) se incluye también una clasificación de los yacimientos por su origen.

Esta clasificación se basa en el estudio de los diferentes procesos geológicos que forman rocas mineralizadas. Estos procesos, que incluyen la cristalización del magma (roca fundida caliente), las actividades hidrotermales, sedimentarias y metamórficas, se describen en la siguiente tabla:

Tabla 1.2
Grandes grupos de yacimientos minerales según su origen

GRANDES GRUPOS DE YACIMIENTOS MINERALES SEGÚN SU ORIGEN			
Grupos / Subgrupos	Proceso de formación	Tipos / Subtipos	Minerales / Sustancias
MAGMÁTICOS	Magmáticos <i>sensu stricto</i> (ortomagmáticos)	Concentración de minerales por cambios físicoquímicos en el magma (inmiscibilidad, cristalización, segregación).	Según roca y proceso Níquel, cobalto, cobre, cromo.
	Volcánicos /subvolcanicos - Hidrotermales	Precipitación de minerales a partir de fluidos (acuosos, gaseosos), más o menos alejados del cuerpo magmático.	Vetas o tipo-pórfido Cobre, oro, molibdeno, plomo, zinc, plata, hierro, manganeso.
SEDIMENTARIOS	Precipitación química	Acumulación de compuestos químicos precipitados en fondos de lagos o mares a partir de soluciones.	Evaporitas (marinas, lacustres) / acumulaciones nodulares Sal común, silvita, yeso, otros sulfatos. Hierro y manganeso.
	Acumulación biogénica	Acumulación de minerales y/o sustancias que portan organismos marinos en sus esqueletos o conchas.	Caliza, fosforita, diatomita.
	Acumulación clástica	Acumulación en superficie (o en fondos de lagos, ríos, mares) de partículas de minerales preexistentes liberados por erosión de sus yacimientos primarios.	Placeres Oro, diamantes, platino, arenas negras de hierro y titanio, zircón, zafiros.

	Residuales	Lixiviación de rocas ricas, en condiciones climáticas tropicales, dejan residuos explotables.	Lateritas	Aluminio, hierro.
METAMÓRFICOS	Metamórficos	Concentración de minerales que se forman en rocas preexistentes debido a cambios en las condiciones de presión y temperatura (por calentamiento, intrusiones, soterramiento, etc.).	Skarns	Estaño, molibdeno, grafito, talco, silicatos de aluminio.

Nota. Tabla de los Grandes grupos de Yacimientos minerales según su origen. Tomado de Herrmann y Zappettini (2014).

1.2 Sulfuros

Los sulfuros son compuestos químicos fruto de la unión del azufre (S) con otros elementos, principalmente metales. Destacan por su aspecto metálico, pudiendo presentar una amplia gama de colores que va desde el amarillo hasta el negro. Algunos son completamente opacos, mientras que otros pueden mostrar cierta transparencia. Por ejemplo, la pirita se caracteriza por su brillo metálico distintivo.

De un punto de vista geológico los sulfuros se originan a través de una serie de procesos complejos, incluyendo la cristalización del magma, la depositación durante procesos hidrotermales, la precipitación química en entornos sedimentarios y la metamorfosis de rocas preexistentes. Estos procesos no solo dan lugar a la formación de los sulfuros, sino que también pueden concentrar elementos químicos de gran interés económico entre los más importantes los metales, como el plomo, el zinc, el cobre y el oro, entre otros, convirtiéndolos en recursos minerales valiosos.

Los sulfuros juegan un papel significativo como contaminantes ambientales cuando entran en contacto con el aire y el agua durante las actividades de extracción minera. Esta interacción conduce a su oxidación, liberando ácido sulfúrico (H₂SO₄) y provocando un descenso del pH en los cuerpos de agua circundantes. Este fenómeno se

conoce como drenaje ácido de mina, y sus efectos son altamente perjudiciales y tóxicos para la vida humana, animal y vegetal, así como para los ecosistemas en general.

Herrmann y Zappettini (2014) exponen el ejemplo de la pirita, un mineral sulfuroso que al entrar en contacto con el oxígeno y el agua desencadena una reacción de óxido-reducción. En este proceso, el azufre se oxida para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4), mientras que el hierro se reduce para generar iones ferrosos (Fe^{2+}). Esta reacción resulta en la producción significativa de ácido, contribuyendo así al fenómeno del drenaje ácido de mina (pp.40-41).

1.3 Concentración de Minerales

La concentración de minerales es un proceso industrial cuyo objetivo es separar los minerales valiosos del material extraído en la explotación minera. Este proceso divide el material en al menos dos grupos principales: el concentrado, que contiene una mayor proporción de los minerales deseados, y la ganga, que es el material no valioso. Estos procesos se pueden clasificar en tres grandes grupos: manual, mecanizado y procedimientos industriales (Blanco, 2014, p.1). Mediante esta actividad, se incrementa significativamente la ley del mineral, es decir, el porcentaje de contenido metálico o de interés en el material procesado. Este proceso es esencial para que la extracción y procesamiento de los minerales sean económicamente viables. Entre las técnicas más comunes utilizadas en la concentración de minerales se encuentran:

1. Trituración
2. Clasificación
3. Gravitación
4. Flotación
5. Magnetismo

1.3.1 *Propiedades Diferenciales*

Las propiedades diferenciales en los procesos de concentración mineral son las características físicas y químicas que hacen posible la separación de los minerales valiosos del material no deseado, conocido como ganga. Entender y utilizar estas propiedades es esencial para seleccionar y aplicar la técnica de concentración más adecuada dependiendo del tipo de mineral a tratar, de manera que se pueda optimizar el proceso de concentración, asegurando una separación eficiente y económica de los minerales deseados de la ganga.

De acuerdo con Bustamante (2008), para lograr una separación efectiva de los minerales, debe existir al menos una propiedad distintiva con valores diferentes, como la gravedad específica, la susceptibilidad magnética, la conductividad eléctrica o una respuesta fisicoquímica superficial claramente distinta (p.2). En la siguiente tabla propuesta por Bustamante (2008) clasifica las propiedades diferenciales en relación con los distintos métodos de concentración:

Tabla 1.3
Propiedades Diferenciales aplicadas a distintos tipos de concentración

Nombre del Método	Propiedades que emplea para separar	Principales aparatos
Concentración Gravitacional	Diferencia de velocidad desedimentación de los minerales	Sedimentador, Hidrociclón, Jig, Canalón, Canaletas, Mesa Vibratoria, Espiral, Conos de Separación Centrífugas, entre otros
Concentración Magnética	Susceptibilidad magnética (atracción o no frente a un Magneto u imán)	Separador magnético de tambor, rodillos magnéticos, separador magnético tipo "carrusel", etc.
Concentración eléctrica	Conductividad eléctrica	Separador eléctrico de alta intensidad
Flotación espumante	Hidrofobicidad y/o hidrofiliidad del mineral (mojamiento o no)	Celdas de flotación y columnas deflotación
Floculación selectiva	Adsorción específica de un polímero y formación de flóculo	Sedimentador
Coagulación selectiva	Adsorción específica de iones inorgánicos y formación de un coágulo	Sedimentador

Nota. Propiedades diferenciales aplicadas a distintos métodos de concentración con sus principales aparatos. Tomado de Notas de Concentración de Minerales, I M CIMEX (p.2) por Bustamante, 2008.

1.4 Índices Metalúrgicos

De acuerdo con Bustamante (2008), los índices metalúrgicos son cálculos adimensionales que permiten determinar la calidad de separación mineral en las etapas de concentración realizadas, además de que favorecen el dimensionamiento de los equipos e instalaciones para los procesos de concentración mineral. Estos índices deben complementarse con un balance de masa que indique que el proceso es correcto y que presenta sentido lógico con relación a las concentraciones y cantidades de material tratado.

Los índices metalúrgicos están clasificados de la siguiente manera.

1.4.1 Índices que se relacionan con calidad

- **Recuperación (R):** Indica la relación entre la cantidad de material de interés obtenido en el concentrado y la cantidad de material de interés presente en el alimento y sirve para tener una relación de la cantidad de material en porcentaje que puede ser recuperado de la corriente de concentrado.

1.1

$$R = \frac{\text{Peso de mineral de interes en el concentrado}}{\text{Peso de mineral de interes en el alimento}}$$

La misma fórmula puede ser expresada en función de las leyes de alimento y concentrado

1.2

$$R = \frac{C \cdot tc}{A \cdot ta}$$

Donde:

C: Peso del mineral en el concentrado

tc: Tenor del mineral en el concentrado

A: Peso del mineral en el alimento

ta: Tenor del mineral en el alimento

- **Razón de Enriquecimiento (RE):** Este índice indica que tan enriquecido está el concentrado obtenido con respecto al tenor del mineral en el alimento. Como referencia se establece que mientras más alejado y mayor de 1 esté el resultado, más enriquecido estará el concentrado.

1.3

$$R_E = \frac{tc}{ta}$$

- **Índice de selectividad:** Expresa la eficiencia de separación entre dos corrientes que bien pueden ser la masa del alimento y la masa de colas.

1.4

$$R_E = \frac{t_a(A) * t_t(T)}{t_a(T) * t_t(A)}$$

Donde:

T: Peso del mineral en las colas

tt: Tenor del mineral en las colas

A: Peso del mineral en el alimento

ta: Tenor del mineral en el alimento

1.4.2 Índices que Relacionan la Capacidad

- **Razón de Concentración (RC):** Este índice metalúrgico indica la relación existente entre la cantidad de material de sólidos presente en la alimentación y la cantidad de material de sólidos en el concentrado.

1.5

$$RC = \frac{A}{C}$$

- **Rendimiento de Concentración (V):** Es el inverso de la razón de concentración.

1.6

$$RC = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC}$$

- **Eficiencia de la Separación (E):** Este índice es la diferencia entre la recuperación menos el rendimiento, todo esto entre la diferencia de la unidad menos el rendimiento de concentración ideal. Este último es un índice que expresa el rendimiento en un escenario condiciones perfectas, lo que en la realidad es difícilmente posible.

1.7

$$E = \frac{R - V}{1 - V_{IDEAL}}$$

1.4.3 Índices Metalúrgicos Ideales

Los índices metalúrgicos ideales son aquellos que hacen referencia a un proceso de separación y concentración perfecto, en donde no existe cantidad de material de interés en las colas y viceversa, no existe material estéril en la corriente de concertados.

Tabla 1.4
Índices metalúrgicos ideales

NOMBRE DEL INDICE METALÚRGICO	EXPRESIÓN DEL INDICE IDEALMENTE	INDICES EN TERMINOS DE TENORES
Recuperación: R	$R_{IDEAL} = 1.0$	$R = \frac{t_a - t_i}{t_c - t_i} \frac{t_c}{t_a}$
Razón de Enriquecimiento R_E	$R_{EIDEAL} = 1/t_a$	$R_E = \frac{t_c}{t_a}$
Índice de Selectividad $I.S.$	$I.S._{IDEAL} \rightarrow \infty$	$I.S. = \frac{t_a(A) * t_b(B)}{t_b(A) * t_a(B)}$
Razón de Concentración RC	$RC_{IDEAL} = 1/t_a$	$RC = \frac{t_c - t_i}{t_a - t_i}$
Rendimiento V	$V = t_a$	$V = \frac{t_a - t_i}{t_c - t_i}$
Eficiencia de separación E	$E = 1.0$	$E = \frac{(t_a - t_i)(t_c - t_a)}{t_a(t_c - t_i)(1 - t_a)}$

Nota. Índices metalúrgicos ideales e índices metalúrgicos expresados en función de los tenores. Tomado de (Bustamante et al., 2008)

1.5 Plantas de Beneficio

Luego de la etapa de explotación mineral las plantas de beneficio desempeñan un rol imprescindible en la separación mineral, ya que son instalaciones industriales que cuentan con los recursos necesarios para llevar a cabo una gran variedad de procesos con el objetivo principal de lograr un enriquecimiento mineral. En estas se busca la separación de minerales de interés mediante corrientes enriquecidas de material, conocido como concentrado, de corrientes empobrecidas también llamadas colas. Este proceso requiere de un estricto seguimiento de cada proceso debido a que estos dependen la transformación, calidad y cantidad de material mineral valioso que se obtendrá al finalizar el proceso.

1.6 Relavera

Naturalmente al obtener un mineral valioso mediante la separación y descarte de otro, se generan residuos sólidos que deben almacenarse con precaución, ya que pueden afectar negativamente a la zona donde se encuentren provocando daños irreversibles al

ambiente y a la imagen de la minería responsable que desde tiempo atrás se ha venido desarrollando.

De manera más precisa según el informe realizado por el Instituto de la Propiedad Industrial (2021) un relave es un residuo generado como consecuencia de procesos mineros y que pueden presentarse en estado sólido, acuoso o en forma de pasta. Además de que engloba todas las actividades superficiales como subterráneas que desarrollan todas industrias o empresas que están involucradas en la extracción mineral.

1.7 Recuperación Metalúrgica en Relaveras

Dado el avance tecnológico en el sector minero y el creciente enfoque en la conciencia ambiental, se han implementado técnicas para tratar pasivos ambientales y reprocesar estos residuos, otorgándoles una nueva utilidad. Esta tendencia ha impulsado la implementación de soluciones innovadoras y tecnologías viables para optimizar la recuperación de metales a partir de estos residuos.

La recuperación metalúrgica en relaveras no es una práctica reciente, como antecedente se tiene que en años pasados dada la limitada tecnología no se podía aprovechar al máximo los depósitos mineros, lo que resultaba en el desperdicio de minerales en las colas finales de los procesos de beneficio mineral. Esto dejaba importantes cantidades de minerales útiles en los depósitos de relaves. La revalorización de relaves no solo tiene un impacto positivo en el medio ambiente al reducir los volúmenes de contaminantes, sino que también representa una oportunidad económica considerable. Las empresas pueden generar ingresos adicionales mediante la recuperación de metales valiosos que anteriormente se consideraban perdidos. Además, esta práctica puede mejorar la sostenibilidad de la minería al reducir la necesidad de nuevas extracciones convirtiendo los residuos mineros en nuevos yacimientos potencialmente explotables.

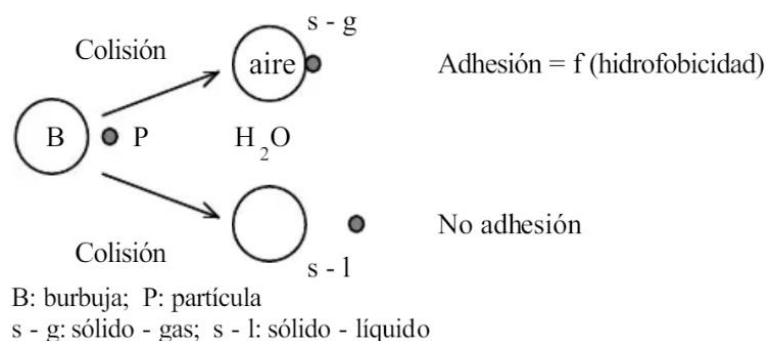
Varios de estos casos son expuestos en un informe titulado “Recuperación de metales valiosos desde residuos mineros” realizado por Instituto Nacional de Propiedad Industrial (2021) de Chile, en este informe se describe una serie de métodos y procesos orientados a la recuperación de metales preciosos, sulfurados, oxidados, en residuos mineros como relaves obtenidos por lixiviación, flotación, aguas residuales acidas con los siguientes procesos:

1. Lixiviación
2. Flotación
3. Separación magnética
4. Implementación de agentes reductores y fundentes
5. Biotecnología a partir de hongos
6. Procesos hidrometalúrgicos

1.8 Flotación de Sulfuros

La flotación es un proceso físico químico de separación y concentración de minerales en una solución acuosa con el fin de hidrofobizar las partículas para que estas sean recogidas en forma de concentrado. Este proceso tiene el objetivo de separar diferentes especies minerales a través de la adhesión selectiva (Castro & García, 2012), en donde ciertos minerales poseen una mayor atracción por los reactivos de flotación que aumenta las propiedades hidrofóbicas que otros, es decir algunos minerales se adhieren con mayor facilidad a las burbujas de aire inyectado junto con la espuma adicionada durante el proceso, lo que, resulta una separación del resto de minerales presentes en la pulpa aprovechando los fenómenos de hidrofobicidad e hidrofobicidad los materiales (Salager & Forgiarini de G.,2007).

- **Minerales Hidrofóbicos:** Corresponden a minerales que poseen una afinidad baja por el agua, lo que hace que minerales como el talco, grafito, carbón, azufre nativo, algunas especies sulfuradas, metales nativos, entre otros, repelan el agua y tengan una alta tendencia a no mojarse. Esta propiedad es clave en los procesos de flotación ya que, ayuda a que la partícula de interés mineral emerja hacia la superficie; sin embargo, para que esta propiedad tenga más eficiencia es necesario adicionar reactivos químicos para mejorar su hidrofobicidad.
- **Minerales Hidrofilicos:** Aquellos minerales que poseen afinidad al agua, la mayoría mineral estéril, además silicatos, carbonatos, sulfatos y óxidos, estos poseen una superficie que tienen alta capacidad de adhesión, absorción y retención de partículas de agua. Esta propiedad provoca que, en los procesos de flotación, la mayoría de estas partículas permanezcan en el fondo del tanque, ya que al adherirse al agua no pueden unirse fácilmente a las burbujas de aire y espuma. Sin embargo, la superficie de estas partículas puede interactuar con múltiples reactivos químicos para modificar sus propiedades, permitiendo así su adhesión a las burbujas de aire o bloqueando completamente esta propiedad.

Figura 1.1*Esquema adhesión selectiva*

Nota. Esquema de adhesión selectiva. Tomado de FLOTACIÓN: Fundamentos y Aplicaciones (p. 1), por Castro & García, 2012.

Para efectuar el proceso se tiene que trabajar con una mezcla uniforme de mineral molida acompañado de agua. Esta mezcla homogénea es llamada pulpa en el cual se presentan tres fases claves:

Fase Sólida

Compuesta principalmente por una muestra sólida con minerales presentes, en donde se busca diferenciar entre minerales hidrofóbicos, que tienden a adherirse a las burbujas de aire, y minerales hidrofílicos, generalmente silicatos, que no se adhieren a las burbujas, sino que se mojan y sedimentan en el tanque de flotación.

Es importante considerar que cada partícula que se trabajara en los procesos de flotación debe de sufrir una reducción de tamaño para que tenga lugar el rompimiento de enlaces químicos y físicos para así aumentar la superficie de contacto entre las partículas minerales y los reactivos de flotación, también mejora la eficiencia de los fenómenos de adsorción frente a los reactivos, facilitando la separación entre los minerales de interés y la ganga.

La teoría sugiere trabajar hasta un 30-40% de sólidos en la pulpa.

Fase Líquida

Normalmente usando agua considerada como un medio ideal para realizar el proceso por su bajo costo y propiedades químicas, en donde su calidad debe de ser óptima para evitar la contaminación y afectar la efectividad del proceso de flotación.

Formando parte de esta fase también aquí son adheridos los reactivos de flotación por su solubilidad de los mismos.

Fase Gaseosa

Presente en las burbujas generadas por la inyección, en donde se adhieren las partículas de mineral presentes en la pulpa con ayuda de espumantes adicionados de

manera que esta fase ayuda al transporte de las partículas hacia la superficie de la pulpa para ser retirada en forma de concentrado.

Una vez definidas las propiedades de los minerales posibles a tratar en la flotación de sulfuros se debe de dar un enfoque específico a los diferentes procesos de separación a los cuales serán sometidos estos minerales en donde el principal objetivo es tener dos productos finales: minerales sulfurados y no sulfurados, aplicando dos tipos de flotación: colectiva y selectiva.

1.8.1 Flotación Colectiva

Es un proceso utilizado de la separación de minerales donde varios minerales son tratados conjuntamente en una sola etapa de flotación en donde son divididos en dos corrientes, de las cuales, una será el concentrado que contiene una mezcla de por lo menos dos o más minerales y finalmente otra corriente de colas en donde estarán presentes los relaves compuestos generalmente por roca estéril, ganga y se trata de reducir al máximo la presencia de minerales de interés.

1.8.2 Flotación Selectiva

Separación de compuestos complejos en productos que contienen no más de una especie individualizada utilizando reactivos químicos resaltando los activadores y depresores.

1.9 Reactivos de Flotación

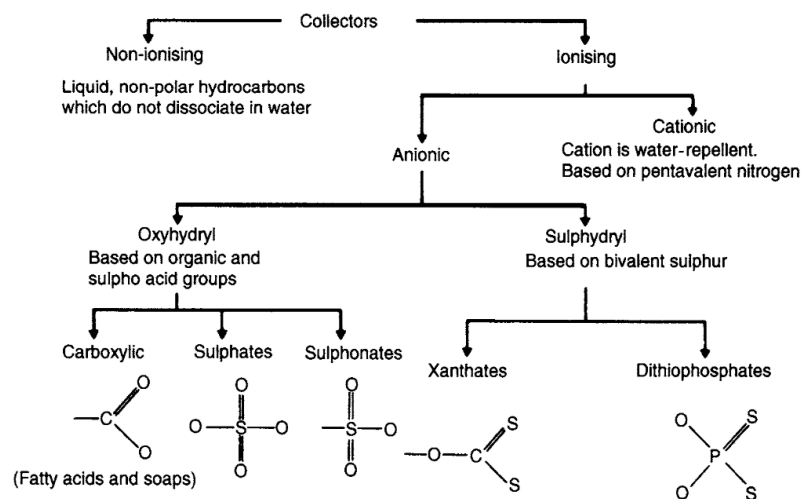
Algunos minerales presentan ciertas propiedades de hidrofobicidad, pero estas pueden no ser lo bastante fuertes para inducir la flotación por sí solas (Alexander, 1963, p. 51). Por lo tanto, es necesario liberar los minerales a través de la ruptura de los enlaces que los mantienen unidos, lo que permite alcanzar un estado óptimo de la partícula. Este proceso involucra la aplicación de colectores, que interactúan con la

superficie del mineral para convertirla en hidrofóbica, facilitando así su flotación en la pulpa mineral. Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta que para efectuar una flotación se tiene que agregar modificadores y espumantes ya que son reactivos sumamente necesarios por lo que sin estos el proceso no es posible.

1.9.1 Colectores

Son compuestos orgánicos que proporcionan la hidrofobicidad a las partículas minerales permitiendo a estas la adhesión a las burbujas presentes en la pulpa. Estos se dividen en dos grandes grupos:

Figura 1.2
Clasificación de los colectores



Nota. Clasificación de los colectores. Tomado de Mineral Processing Technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, (p.271), por Barry A. Wills, Tim Napier-Munn, 2006.

1.9.1.1 Colectores Aniónicos

Este grupo de reactivos, compuesto por aminas y sus derivados amínicos, se caracteriza por su fácil adsorción y desorción, lo que los hace efectivos en la flotación debido a un mecanismo de atracción electrostática. Aunque generalmente son menos selectivos que los colectores aniónicos, destacan en flotaciones específicas, como la de

cuarzo, silicatos y ciertos minerales oxidados, donde son considerablemente más eficaces. Además de su capacidad colectora, tienen la ventaja de ser poco sensibles a la presencia de iones extraños en la pulpa, lo que los hace apropiados para tratamientos con aguas duras¹. También son robustos frente a variaciones de pH, lo que los convierte en una opción confiable en condiciones de procesamiento variables. Sin embargo, su eficacia puede verse afectada por la presencia de ciertos contaminantes o impurezas en el proceso de flotación.

No Ionizables

En la flotación de minerales hidrofóbicos como el carbón, el grafito, el azufre o la molibdenita, los colectores no iónicos son cruciales. Estos incluyen sustancias como el queroseno, los hidrocarburos o los aceites hidro-carburados sin grupos polares. Debido a su fuerte hidrofobicidad y la ausencia de grupos polares, estos colectores no pueden adherirse a las superficies minerales por sí mismos y requieren ser combinados con otros compuestos orgánicos heteropolares para formar una película adsorbida. Se utilizan, por lo tanto, en un proceso de co-adsorción. Dado que son insolubles en agua, su distribución puede ser problemática y se requieren métodos mecánicos para una dispersión adecuada, como la agitación mecánica. Además, se debe tener precaución con su presencia no controlada debido a su efecto negativo en la formación de espuma, lo que puede causar problemas significativos en el proceso de flotación, como la disminución de la selectividad y la eficiencia de la recuperación de minerales.

¹ Aquellas que contienen altas concentraciones de minerales en forma de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos.

1.9.1.1.1 Tipo Oxidril

Carboxílicos

Los ácidos grasos y sus sales, como los jabones, pertenecen a este grupo. Han desempeñado un papel crucial en la historia de la flotación debido a su notable capacidad colectora. Sin embargo, su limitada selectividad ha impedido una separación eficiente de minerales, lo que ha llevado a un reemplazo gradual y casi completo por los colectores sulfhídricos. Su uso actual se restringe principalmente a minerales oxidados y no metálicos, donde todavía muestran cierta efectividad en la recuperación de minerales valiosos. Además, su capacidad para formar películas adsorbidas en la superficie de los minerales contribuye a la estabilidad de la espuma en el proceso de flotación.

Sulfatos y Sulfonatos

Estos reactivos, que se obtienen mediante procesos de sulfuración o sulfatación de alcoholes, son ampliamente utilizados en la flotación selectiva de óxidos y sales minerales debido a su capacidad para mejorar la selectividad del proceso. Es importante destacar que, además de su función colectora, poseen propiedades espumantes que pueden facilitar la formación y estabilidad de la espuma durante la flotación. Sin embargo, esta característica también puede presentar desafíos, especialmente en la optimización del control de espuma y en la recuperación selectiva de minerales.

1.9.1.1.2 Tipo sulfhídrico

Xantatos

Los xantatos son sales de sodio o potasio derivadas del ácido xántico o xantogénico. En la industria minera, estos reactivos se utilizan extensamente debido a su bajo costo, su capacidad efectiva de recolección y su alta selectividad. Son eficaces para la flotación de sulfuros, minerales nativos y minerales oxidados sulfurados,

actuando como colectores que facilitan la separación de estos minerales del material no deseado. Las propiedades hidrofobizantes de los xantatos hacen que los minerales aumenten la capacidad de repeler partículas de agua para así adherirse a las burbujas de aire inyectado en los procesos de flotación. Según Perales Agüera (2011) estos reactivos son utilizados en dosis que varían entre 5 y 100 g/t (p. 4), dependiendo de la naturaleza del mineral y las condiciones específicas del proceso. Además, su eficacia puede verse afectada por factores como el pH del medio, la presencia de otros reactivos y la temperatura de la pulpa, lo que requiere ajustes precisos para optimizar su rendimiento. Wills & Napier-munn (2006) recomiendan trabajar en un pH de 8 a 13.

Nitrofosfatos

Son ésteres secundarios del ácido ditiofosfórico que se producen mediante la reacción del pentasulfuro de fósforo con alcoholes, y se conocen comercialmente como Aerofloats. A diferencia de los xantatos según Perales Agüera (2011), estos colectores tienen un menor poder de recolección, lo que requiere el uso de dosis más altas, típicamente entre 10-50 g/tonelada. Además, su mayor solubilidad en agua hace que sean más afectados por los depresores, lo que es un factor importante en su aplicación en procesos de flotación global, especialmente en minerales sulfurados. Una ventaja adicional es que son menos propensos a la hidrólisis, lo que permite su efectividad en medios ligeramente ácidos, con un pH óptimo de funcionamiento alrededor de 4-12. Esto los hace adecuados para la flotación de minerales como la calcopirita y la esfalerita en condiciones específicas.

Tioles

Son efectivos para la flotación de sulfuros de cobre y zinc, así como para minerales oxidados. Funcionan en un rango de pH de 4 a 12 y son útiles para recuperar minerales de baja ley. Sin embargo, su uso se ve limitado por su olor desagradable y la necesidad de un manejo cuidadoso debido a su toxicidad. Además, tienden a ser más costosos que otros colectores, lo que puede restringir su aplicación en ciertas operaciones mineras.

Ditiocarbamatos

Son colectores secundarios utilizados en la flotación de minerales que contienen sulfatos de cobre y plata, proporcionando una mayor velocidad y eficiencia en el proceso. Compiten con los xantatos en términos de sus propiedades colectoras, pero su costo más alto puede limitar su competitividad. Estos colectores secundarios son especialmente efectivos según Wills & Napier-munn (2006) trabajan en un rango de pH de 8 a 13, es decir alcalino y son conocidos por su capacidad para mejorar la recuperación de minerales valiosos en concentrados de alta ley. Además, su selectividad en la flotación de minerales específicos puede ofrecer ventajas en ciertos procesos de separación mineral.

Difenil Tiourea o Tiocarbanilida

Según Perales Agüera (2011) menciona que: “Su propiedad más destacable es la de ser un excelente colector para la galena y no hidrofobizar la superficie de la pirita (p. 5)”.

1.9.2 Modificadores

Los modificadores, también llamados reguladores, controlan y ajustan el pH de la pulpa volviéndola acida o básica, generalmente se usa carbonato e hidróxido de sodio, cal y ácido sulfúrico, tienen un uso extendido en la flotación para ajustar la acción del colector, ya sea aumentando o disminuyendo su efecto hidrofóbico en la superficie del mineral. Esto permite una mayor selectividad del colector hacia ciertos minerales. Los reguladores pueden ser categorizados como activadores, depresores o modificadores de pH.

1.9.2.1 Activadores

Mejora la flotabilidad de ciertos minerales poco flotables en condiciones estándar, aumenta la afinidad de las partículas a los colectores, estos reactivos alteran la naturaleza química de las superficies minerales para que se vuelvan hidrofóbicas debido a la acción del colector. Los activadores son generalmente sales solubles que se ionizan en solución, y los iones luego reaccionan con la superficie del mineral.

Algunos ejemplos de los activadores propuestos por Castro & García (2012, p. 76) son:

1. Sales solubles de metales pesados no ferrosos (Cu, etc.), los cuales activan la pirita, esfalerita, cuarzo y ciertos sulfuros minerales.
2. Las sales solubles de metales alcalinos térreos (Ca, etc.) activan la flotación del cuarzo y otros minerales no sulfurados.
3. Sulfuro de sodio y otros sulfuros solubles son usados en la activación de minerales metálicos no ferrosos oxidados. (Ej. Cerusita, malaquita, etc.)
4. Oxígeno (como oxígeno atmosférico) activa la flotación de sulfuros y de un número de minerales no sulfurados.

Otro ejemplo es sugerido por Wills & Napier-munn (2006) es el uso de sulfato de cobre como un activador en procesos de flotación selectiva de minerales de plomo y zinc, afirmando que en cierta medida los iones presentes de cobre pueden activar la galena, calcita y piritita, flotando en medios alcalinos de 10.5 a 12 en escala de pH agregando cal en conjunto con este activador.

Sin embargo, los minerales oxidados de plomo, zinc y cobre, como la cerusita, la smithsonita, la azurita y la malaquita, flotan de manera ineficiente con colectores sulfhídricos y requieren grandes cantidades de sulfuro de sodio o hidro sulfuro de sodio para activarse. Esto se debe a que los iones de metales pesados deben precipitarse antes de que los colectores interactúen con el mineral. Controlar la cantidad de sulfuro de sodio agregado a la pulpa es crucial, ya que en exceso puede deprimir minerales de óxido activados, como también eliminar el oxígeno de la pulpa. La cantidad de sulfidizante agregada debe ser suficiente para producir una película coherente de sulfuro en la superficie del mineral, permitiendo la adsorción del colector.

1.9.2.2 Depresores

Se utiliza para aumentar la selectividad de la flotación al volver hidrofílicos ciertos minerales, evitando así su flotación. Son clave para la flotación económica de ciertos minerales como los sulfuros de platino y níquel. Estos inhiben la flotación de partículas lo que permite una mejor selectividad entre los minerales de interés y los relaves o ganga, disminuyendo o bloqueando la capacidad de flotar hidrolizando a las partículas, estos se dividen en dos grupos depresores inorgánicos y depresores poliméricos.

Algunos ejemplos de los depresores recomendados por Castro & García (2012, p. 76) son:

1. Sulfuro de sodio y otros sulfuros solubles, usados sobre todo para minerales no sulfurados.
2. Cianuros son usados en la flotación selectiva de esfalerita, minerales de cobre y pirita.
3. Sulfitos e hiposulfitos y ciertos sulfatos (por ejemplo, Zn y sulfatos ferrosos) son usados principalmente para flotación selectiva de los minerales sulfurados y la esfalerita.
4. Sales de cromo (K_2CrO_4 ; $K_2Cr_2O_7$), son usados sobre todo como depresores de la galena.
5. Silicato de sodio (water, Glass) usado como depresor de cuarzo y para otros típicos minerales de ganga y también en la flotación selectiva de un número de minerales no sulfurados.
6. Reguladores orgánicos no ionizables (amida, dextrina, ácido tánico, etc.) usados como depresores para un número de minerales no sulfurados.
7. Cal - Óxido de calcio - CaO , es un depresor específico para la flotación de minerales sulfurados.

El silicato de sodio también se utiliza como depresor en algunos sistemas, siendo uno de los agentes reguladores más ampliamente utilizados en la flotación de minerales no sulfurados, como la scheelita, la calcita y la fluorita.

1.9.3 Espumantes

Los espumantes para Wills & Napier-munn (2006) desempeñan un papel crucial en la flotación de minerales hidrofóbicos como el carbón, el grafito, el azufre o la molibdenita. Su función incluye estabilizar la formación de burbujas, permitir el drenaje selectivo de la ganga y mejorar la velocidad de flotación. La importancia de los espumantes en el rendimiento de la flotación ha sido cada vez más reconocida, y se está

investigando a fondo los factores que afectan su estabilidad. Químicamente similares a los colectores iónicos, los espumantes deben ser lo suficientemente estables para permitir una transferencia eficiente del mineral flotado y evitar problemas como la acumulación de espuma. Son reactivos orgánicos superficiales heteropolares que actúan adsorbiéndose en la interfaz aire-agua y reduciendo la tensión superficial. Los espumantes más efectivos son solubles en agua y contienen grupos como sulfuroso, amino, carbonilo o hidroxilo. Para Perales Agüera (2011) los agentes más apropiados para realizar espuma son: Alcoholes alquílicos y acrílicos ácidos carboxílicos Aldehídos, Cetonas Aminas y Nitrilos (p. 15).

En resumen, son reactivos tensoactivos² a la formación de burbujas para el transporte de la partícula mineral hacia la superficie de la pulpa, formando una espuma estable generando un concentrado.

1.10 Análisis de Difracción por Rayos-x

Según Malvern Panalytical (2020) la difracción de rayos X (XRD) es una técnica de laboratorio especializada en analizar las propiedades físicas para conocer la composición de fases, la estructura cristalina y la orientación en muestras de polvo, sólidas y líquidas. También permite obtener información detallada sobre la composición química y el tipo estructural de la muestra, denominada como “fase mineral”, facilita el análisis cuantitativo de las fases presentes y la determinación de parámetros de red. Una de las ventajas del análisis mediante XRD es su rapidez, ya que proporciona resultados en menos de 20 minutos de manera confiable y precisa, utilizando una mínima cantidad de muestra pulverizada.

² Compuestos químicos que tienen la capacidad de reducir la tensión superficial compuestos por una parte hidrofílica y otra hidrofóbica.

Para la identificación de cada uno de estos parámetros, se lleva a cabo una comparación de los patrones de difracción de la muestra con patrones de referencia conocidos, almacenados en una base de datos referenciada en el Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD, del inglés “International Center of Diffraction Data”).

Uno de los equipos utilizados en este proceso es el difractor de rayos X BRUKER, modelo D8 ADVANCE que según la Universidad Técnica Particular de Loja “utiliza un haz de rayos X de una longitud de onda específica para interactuar con sustancias cristalinas y provocar el fenómeno físico llamado difracción de rayos X”.

1.11 Análisis de Absorción Atómica

Según Argentina.gob.ar (2023) menciona que, la absorción atómica es un método ampliamente utilizado para la identificación de metales en muestras relacionadas el entorno natural tales como el agua, suelo, roca y aire, así como en muestras o productos asociados a la industria minera, alimentaria, etc.

También es necesario destacar que Martínez (2020) menciona que, para trabajar en Absorción Atómica, los instrumentos requieren tres componentes esenciales: una fuente de energía (radiación), una celda para la muestra y un equipo para medir la energía.

Los componentes básicos de un espectrómetro de Absorción Atómica, tanto de llama como de horno de grafito, son los siguientes:

1. **Fuente de radiación:** Normalmente, se emplea una lámpara de cátodo hueco o una lámpara de descarga sin electrodos, la cual emite luz en la longitud de onda específica del elemento que se desea analizar. Esto asegura que se mida exclusivamente la absorción del elemento particular en estudio.

2. **Sistema de atomización:**

- **Llama:** La muestra líquida se introduce en una llama que suministra la energía térmica requerida para dissociar el analito y generar átomos libres. Las llamas más utilizadas son las de aire-acetileno y óxido nitroso-acetileno.
- **Horno de grafito:** Proporciona una atomización más eficiente y precisa, ya que la muestra se calienta en un pequeño tubo de grafito, lo que permite detectar concentraciones más bajas del analito³.

3. **Monocromador:** Un aparato óptico que selecciona las radiaciones en la longitud de onda particular del elemento que se está analizando. Esto ayuda a evitar la interferencia de otras radiaciones y garantiza que únicamente se mida la absorción de la longitud de onda específica deseada.

4. **Detector:** Transforma la luz transmitida en una señal eléctrica. Generalmente, se emplean fotomultiplicadores, los cuales son extremadamente sensibles a niveles bajos de luz, permitiendo así la detección de concentraciones mínimas de elementos.

5. **Sistema de registro de datos:** Este sistema gestiona la señal del detector y almacena los datos recolectados. Normalmente, incorpora un software especializado que simplifica el análisis y la interpretación de los resultados, produciendo informes precisos y detallados.

³ Sustancia o componente químico específico que se desea identificar o cuantificar en una muestra durante un análisis químico.

2 CAPITULO II: Recuperación de Sulfuros en la Relavera

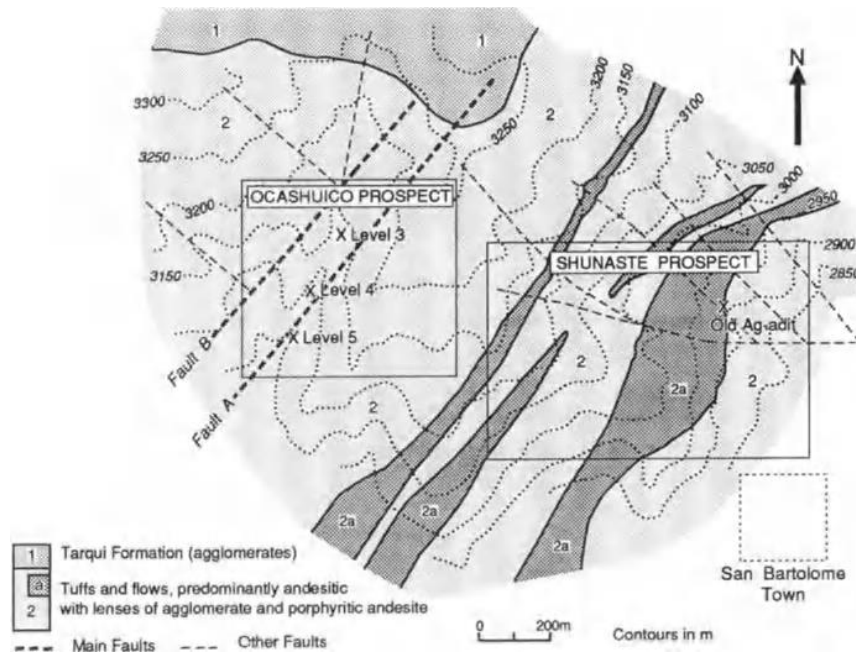
2.1 Antecedentes Generales

San Bartolomé es una parroquia rural perteneciente al cantón Sígsig en la provincia del Azuay, fundada en 1574 con una extensión de aproximadamente 37 kilómetros cuadrados, a la que se puede acceder tomando como punto de partida la ciudad de Cuenca ubicada a 30 Km de distancia, mediante dos vías de primer orden. La primera mediante la vía Cuenca - El valle - Santa Ana, y la otra mediante la vía Cuenca-El Descanso – Gualaceo – Chordeleg - La Unión.

Es un pueblo de dedicación agrícola popularmente conocido por ser tierra de las manzanas y las guitarras, conformado por 21 comunidades y 6 barrios los cuales promedian un clima con temperaturas entre 17° y 20° y una altitud de alrededor de los 20790 metros sobre el nivel del mar.

2.2 Geología Local

La zona de San Bartolomé posee una geología conformada por múltiples grupos de formaciones como el grupo Paute, constituido por las formaciones de Yunguilla y Biblián, también está el grupo Azogues conformado por la formación Loyola y Azogues. Y finalmente, el grupo Ayancay conformado por las formaciones de Mangan, Santa Rosa, Turi y la formación Tarqui. Se registró la presencia de depósitos polimetálicos cuyo contenido va desde mineralizaciones de hierro, oro, plata, platino, manganeso hasta minerales metálicos de base de cobre, plomo y zinc, además, de minerales poco comunes como lo son el tungsteno, molibdeno, talio, entre otros.

Figura 2.1*Mapa de la geología regional*

Nota. Mapa de la geología regional de la zona de San Bartolomé. Tomado de Mulshaw & Puig (1994).

2.3 Mineralización

A lo largo del depósito mineral Mulshaw S. y Puig C (1994) señalan que los principales minerales encontrados en las betas incluyen esfalerita, pirita, marcasita, galena, boulangerita y pirrotita, es decir, se hallan y abundan principalmente sulfuros. También destaca la presencia de tetraedrita argentífera (freibergita), la cual contiene principalmente 40,25% de plata, 21,60% de sulfuro, 18,93% de antimonio, 11,86% de cobre, 3,88% de arsénico y 3,47% de hierro. Además, se encuentran varios otros sulfuros de plata como owyheeite, freieslebenita, polibasita y pirargirita/pirostilpnita, que constituyen las principales fuentes de plata. Asimismo, pueden observarse cantidades menores de arsenopirita en forma de cristales idiomorfos gruesos y, en casos menos comunes, calcopirita. En lo que respecta a la ganga, está compuesta principalmente por cuarzo, calcedonia y rodocrosita en tonos rosados, con

características esferulíticas e idiomorfas. Además, se encuentran carbonatos dolomíticos que contienen hierro y manganeso, junto con calcita y cantidades mínimas de siderita.

2.4 La Mina de San Bartolomé

El depósito de San Bartolomé fue descubierto gracias a una exploración a cargo del Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo por sus siglas en inglés UNDP (United Nations Development Programme) a mediados hasta finales de los años 60's, en esta fase de exploración se delimitaron dos áreas de potencial económico: Shunaste, ubicada al norte del pueblo de San Bartolomé, y Ocashuico aproximadamente a 2 km al nor-este del pueblo.

Según Mulshaw S. y Puig C (1994), se estima que el total de reservas acumulaba un total de 55 000 toneladas (probadas) y 150 000 toneladas (probables), teniendo alrededor de 20 onzas/tonelada de plata, 2.9% de Zinc y 1.15% en plomo. También los autores señalan que la mina de San Bartolomé tenía la distinción de haber producido el concentrado a granel con el contenido de Pb/Ag de mayor rango en el mundo (en la época), con una concentración de plata con más de 800 onzas por tonelada.

2.5 La Relavera de San Bartolomé

La relavera se encuentra parcialmente sumergida por agua con una extensión de 54349.57 m², en donde el terreno está en su totalidad húmedo, con una consistencia pantanosa de un olor fuerte a sulfuros.

2.6 Propuesta de Investigación

El problema más grande que ha dejado la empresa Armenonic está presente en el depósito de relaves, en estos se acumulan materiales sólidos finos producto del descarte de las actividades posteriores al beneficio de los minerales, de los cuales, analizando los antecedentes de la zona se presume que se pueden encontrar grandes cantidades de

material no recuperado entre ellos minerales pesados y metálicos, junto con gran parte de los reactivos utilizados a lo largo del proceso de beneficio aplicado por la empresa.

Este es un problema que se debe de tomar con suma seriedad ya que la relavera al ser un pasivo ambiental y al poseer metales pesados, estos tienden a ser desplazados por asuntos geoquímicos a zonas críticas como son los depósitos de agua aledaños a la zona de incidencia

El retratamiento de estos minerales proporcionara a la zona una opción de reducir los materiales contaminantes presentes, así como un beneficio económico mediante flotación selectiva.

Para poder aprovechar los minerales primero se deberá obtener una serie de muestras representativas para ser analizadas en un laboratorio mediante ensayos de difracción de rayos X (XRD); una vez identificada las especies minerales presentes se propondrá un método de recuperación a minerales específico para su tratamiento mediante flotación selectiva llevado a cabo en los laboratorios de la Universidad Del Azuay.

2.6.1 *Visita Técnica*

La visita técnica a la relavera proporcionó una oportunidad crucial para evaluar visualmente el estado del sitio y detectar problemas potenciales. Durante la inspección, se identificó un problema significativo: una corriente de agua fluía directamente hacia la relavera, causando que la zona inicial de la fuente de agua estuviera parcialmente húmeda hasta 300 metros y que el resto del área estuviera completamente inundado, formando una laguna.

Se observó que al final de la laguna, la relavera contaba con desfuegos que conducían el agua a un canal que desembocaba en un sistema de drenaje. Es importante destacar que las paredes del canal estaban cubiertas de óxido, y se encontraron lodos

sedimentados en el fondo de las fuentes de agua cercanas. Estos sedimentos y la oxidación indican posibles procesos de corrosión y acumulación de metales pesados, lo cual podría tener implicaciones ambientales significativas.

Figura 2.2
Relavera de San Bartolomé



Nota. Fotografía de los autores en la relavera de San Bartolomé Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 2.3
Sedimentos en una fuente de agua cercana



Nota. Fotografía de una fuente de agua cercana contaminada por sedimentos oxidados.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 2.4

Drenaje implementado en la laguna de la relavera



Nota. Fotografía del drenaje implementado en la laguna de la relavera. Realizado por:

Mora y Reiban (2024).

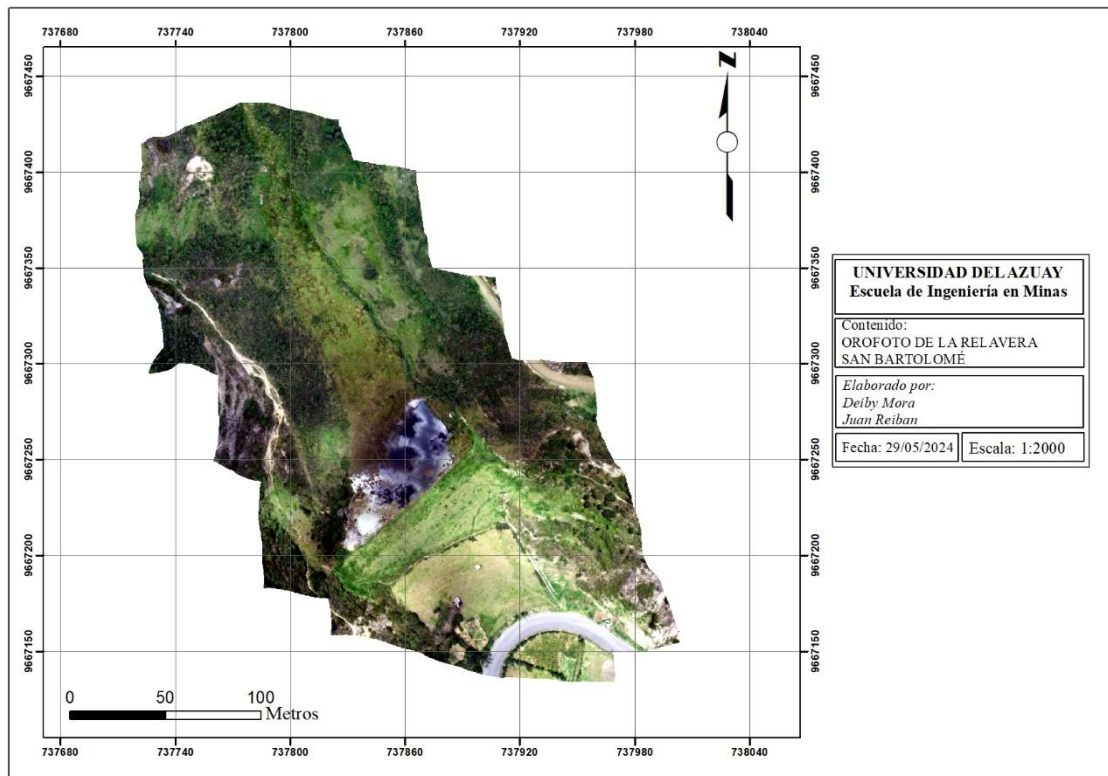
2.6.2 Topografía

La topografía de la relavera se realizó con ayuda del dron DJI Phantom 4 RTK, cubriendo un área total de 3 hectáreas. Antes del vuelo, se establecieron diez puntos de control en tierra (GCPs) alrededor y dentro de la relavera. Estos puntos fueron georreferenciados utilizando un receptor GPS de alta precisión, proporcionando datos de referencia cruciales para mejorar la exactitud del modelo topográfico final. El dron voló a una altura de 100 metros sobre el terreno con una duración de 10 minutos aproximadamente, capturando imágenes con una resolución de 2 cm por píxel, lo que permitió obtener detalles finos de la superficie de la relavera. El vuelo se realizó en condiciones climáticas óptimas, con cielo despejado y vientos suaves, minimizando el riesgo de distorsiones en las imágenes debido a movimientos indeseados del dron.

El resultado final proporcionó una representación topográfica precisa de las 3 hectáreas de la relavera, incluyendo mediciones exactas de cambios en la topografía y obteniendo finalmente las curvas de nivel adecuadas. Estos datos son esenciales para el análisis posterior, permitiendo el cálculo del volumen para la estimación de las posibles reservas y para evaluar los puntos de muestreo.

Figura 2.5

Ortofoto de la Relavera de San Bartolomé



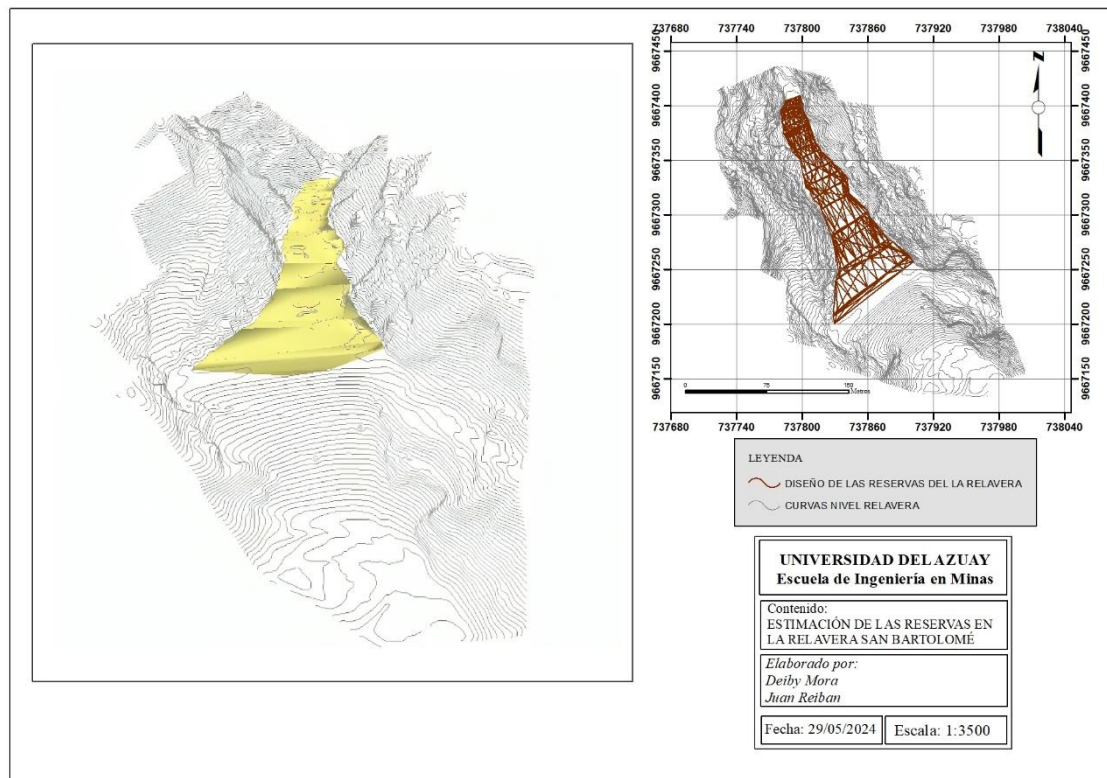
Nota. Ortofoto de la zona de la relavera. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.6.3 Cálculo del Volumen

El volumen de la relavera se calculó utilizando el software RecMin. Tras recolectar la información topográfica y las curvas de nivel del área, estos datos se importaron al software para estimar el volumen de la relavera mediante la creación y visualización de sólidos. Inicialmente, se importaron los datos topográficos en formato DXF. Con esta información, se generó un modelo digital del terreno que representaba con precisión la topografía del área de estudio. Luego, utilizando las herramientas de

cálculo de volúmenes de RecMin al crear sólidos, se seleccionaron las superficies del terreno y del depósito de relaves. El software permitió calcular el volumen del material depositado mediante sólidos, finalmente se obtuvo un volumen de 48 989.18 m³.

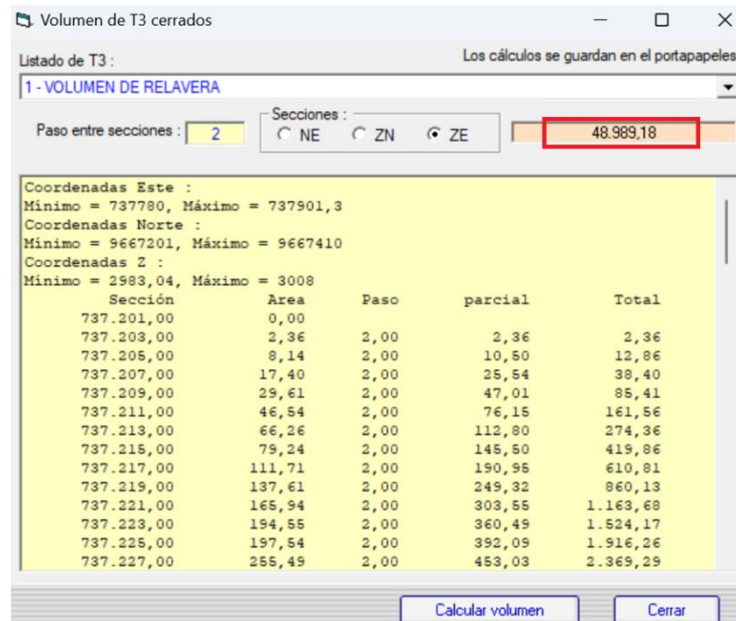
Figura 2.6
Volumen de la relavera



Nota. Estimación de reservas de la relavera en el software Recmin. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 2.7

Calculo del volumen de la relavera mediante el software RecMin



Nota: Obtención de volumen de la relavera mediante secciones en el software Recmin.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

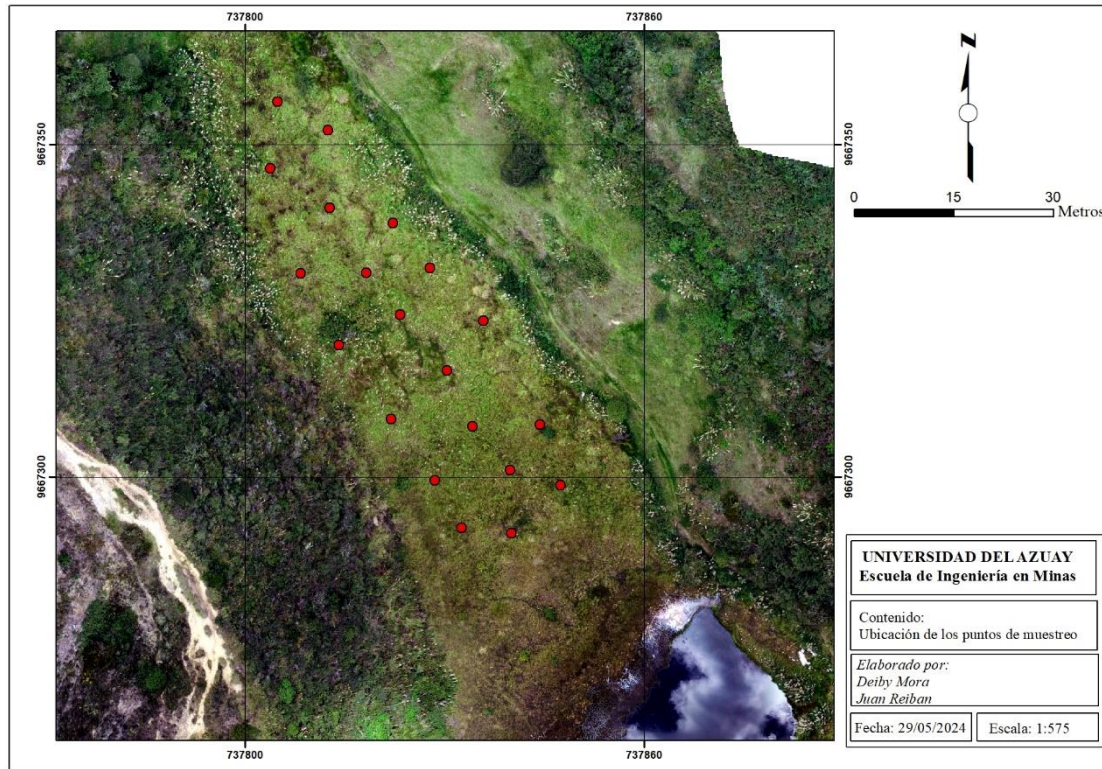
2.6.4 Obtención de Muestras

La obtención de muestras fue una actividad crucial para el desarrollo de este proyecto de titulación y el análisis del depósito de relaves. Este proceso permitió identificar parámetros clave como las especies minerales presentes, la densidad, la textura y el pH de las muestras. Gracias a ello, se logró obtener una muestra representativa y homogénea empleando la siguiente metodología:

1. Selección de los Puntos de Extracción y Planificación

Con ayuda de la topografía se seleccionaron 20 puntos de muestreo ideales distribuidos estratégicamente a lo largo de la relavera para obtener una muestra representativa adecuada del sitio. Se tuvo que tomar en cuenta que en ciertas zonas no se podía acceder por lo que el sitio estaba saturado de agua.

Figura 2.8
Puntos de la toma de muestra en la relavera



Nota: Ubicación aproximada de los puntos de donde se tomaron las muestras. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2. Extracción de muestras

La extracción de las muestras se la realizo manualmente por los autores mediante el uso de barretas, un combo y un tubo PVC para simular un corta hoyos.

La barreta se introdujo en el terreno de manera de obtener un área circular y perforar hasta obtener una profundidad de 1.70 metros, después se introducía el tubo mediante golpes controlados con ayuda del combo. A medida que avanzaba la perforación se extraía el material adherido al tubo hasta obtener aproximadamente 450 gramos y se colocó en bolsas diferentes.

Figura 2.9
Extracción de muestras de la Relavera



Nota: Obtención de las muestras en la relavera. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

3. Homogenización

Una vez recolectadas las 20 muestras, se procedió a extenderlas de manera homogénea en un área limpia, impermeabilizada y seca para garantizar un proceso de secado adecuado. Esta área fue seleccionada cuidadosamente para evitar cualquier tipo de contaminación externa que pudiera alterar los resultados de los análisis. El proceso de secado se llevó a cabo durante aproximadamente dos semanas, permitiendo que las muestras perdieran toda la humedad residual y alcanzaran un estado adecuado para los análisis posteriores.

Figura 2.10

Recolección total de la muestra



Nota: Muestras totales recolectadas de todos los puntos de extracción. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Una vez la muestra estaba completamente seca se realizó una trituración con un combo y una molienda con ayuda del molino de bolas hasta obtener una granulometría pasante malla 100. Posteriormente la muestra fue cuarteada hasta obtener 500 gramos para después enviarla a un laboratorio para el respectivo análisis.

2.6.5 Caracterización Mineral

Como se había plateado con anterioridad es de suma importancia realizar una caracterización de los minerales presentes en el depósito de relaves por lo que los 500 gramos de la muestra fue enviado a un laboratorio para realizar un análisis mineralógico por difracción de Rayos X (XRD) empleando el difractómetro D8 ADVANCE, y el programa para la determinación cualitativa y semicuantitativa HighScore Plus, lo que permite identificar cualitativa y cuantitativamente la composición mineralógica de la muestra.

El informe realizado en el laboratorio arrojó los siguientes resultados:

Tabla 2.1

Análisis mineralógico de la muestra: M1

Muestra	Fases Minerales	Semicuantificación (%)
M1	Cuarzo	37
	Calcopirita	2,5
	Pirita	2,5
	Moscovita	37,6
	Albita	20,5

Nota: Análisis mineralógico de la muestra representativa donde confirma la existencia de sulfuros (pirita y calcopirita) además se nota la presencia de silicatos.

Los resultados de la difracción de rayos X revelan una notable concentración de pirita (2,5%) y calcopirita (2,5%) en las muestras analizadas. La pirita (FeS_2) y la calcopirita (CuFeS_2) son sulfuros de gran interés debido a su potencial para la recuperación de cobre. También se encontraron altas concentraciones de silicatos, incluyendo albita, cuarzo y moscovita, siendo estos dos últimos los que presentaron las mayores concentraciones.

2.6.6 Propuesta de Flotación

Para el proceso de flotación se dividió en dos etapas para la separación y concentración de minerales. En la primera etapa de flotación, se buscó separar los sulfuros encontrados en análisis previos de los minerales silicatos. Este paso inicial utilizará reactivos colectores específicos que promuevan la adhesión de los sulfuros a las burbujas de aire, permitiendo su separación de los silicatos, que quedarán como relaves. En la segunda etapa, se procedió a una flotación selectiva para separar los dos sulfuros principales: pirita y calcopirita. En esta etapa, se utilizaron depresores

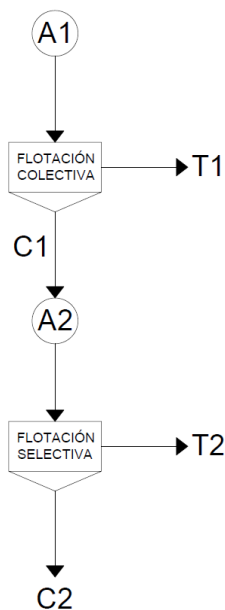
específicos para pirita, lo que permitirá que la calcopirita flote y se concentre mientras la pirita se mantiene en la fase acuosa.

2.6.7 Aplicación Metalúrgica

Para la aplicación metalúrgica, se presenta el siguiente diagrama de flujo, dividido en dos etapas de flotación: una flotación colectiva y una flotación selectiva.

Figura 2.11

Diagrama de flujo propuesto para la flotación colectiva y selectiva



Nota. Propuesta del diagrama de flujo dividido en dos tipos de flotaciones. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Utilizando los índices metalúrgicos planteados con anterioridad, cada flotación se divide en tres corrientes:

1. **A:** Alimento.
2. **C:** Concentrado.
3. **T:** Colas.

2.7 Protocolo de Flotación Colectiva

En los procesos de flotación es importante mantener una secuencia ordenada y con tiempos definidos para los procedimientos que serán realizados, ya que cada componente tiene un alto grado de beneficio o afectación a todo el proceso. Además de

esto es indispensable conocer las condiciones iniciales de material a tratarse para evaluar su comportamiento y elaborar dosificaciones adecuadas con los reactivos involucrados definiendo un valor de pH adecuado en consideración a la mayor eficiencia con la que trabajan cada uno.

Tabla 2.2
Parámetros para la flotación colectiva

PARÁMETRO	INTERVALO	VALOR ESTABLECIDO
Porcentaje Sólidos en la suspensión	15% - 30%	30%
Regulador de pH (Hidróxido de sodio)	9.5 - 11.5	11
Colector (X. amílico de Potasio Z6)	20 – 150 (gr/ton)	100 (gr/ton)
Espumante (ER-370)	100 – 250 (ml/ton)	250 (ml/ton)
Tiempo de acondicionamiento	10 – 15 (min)	14 (min)
Tiempo de recolección burbujas	2 – 15 (min)	2 (min)
Revoluciones de trabajo de la celda de flotación	900-1200 (rpm)	950 (rpm)

Nota. Descripción de los parámetros y reactivo usados en la flotación colectiva.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.8 Preparación de la pulpa

Para realizar el proceso de flotación colectiva se definió que la pulpa tenga un porcentaje para sólidos del 30 % y para líquido del 70%, luego se procedió a calcular la cantidad de sólidos y líquidos adecuados que estos porcentajes representan teniendo como volumen de la celda de flotación 1000 cm³ o 1 litro. Para estos cálculos primero fue necesario obtener la densidad del material.

2.8.1 Densidades

Para obtener la densidad del material se utilizó un picnómetro con capacidad de 10 ml, el proceso consistió en pesar 3 muestras en una balanza analítica para luego utilizar la siguiente ecuación de densidad:

2.1

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3}$$

Donde:

m1: Peso de la muestra del material (gr)

m2: Peso del picnómetro lleno de agua (gr)

m3: Peso del picnómetro con el agua y el material (gr).

Una vez obtenidos los pesos de cada muestra se reemplazó los datos en la ecuación y se obtuvo la densidad del material. La cantidad de material usado en esta práctica representaba alrededor de un cuarto de la capacidad del picnómetro.

Figura 2.12

Cálculo de la densidad de la muestra



Nota. Cálculo de la densidad mediante picnómetro. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Para mayor exactitud, se repitió el proceso 4 veces y se promedió las densidades obtenidas, por lo que la densidad del material es de 2.1119 gr/cm³.

Con la densidad del material ya obtenida, se estimó la densidad de la pulpa mediante la siguiente ecuación:

2.2

$$\rho \text{ pulpa} = \frac{1}{\frac{1}{\rho \text{ solido}} * \% \text{ solidos} + \frac{1}{\rho \text{ liquido}} (1 - \% \text{ solidos})}$$

Reemplazando se obtiene que:

2.3

$$\rho \text{ pulpa} = \frac{1}{\frac{1}{2.1119 \text{ gr/cm}^3} * 0.30 + \frac{1}{1 \text{ gr/cm}^3} (1 - 0.30)}$$

Finalmente, la densidad de la pulpa es: **1,1877 gr/cm³**.

Una vez conocida la densidad y el volumen de la pulpa, el cual es de **1000cm³**, se pudo calcular la cantidad en masa de la pupa necesaria para la flotación con ayuda de la siguiente formula:

2.4

$$\rho \text{ pulpa} = \frac{\text{Masa pulpa}}{\text{Volumen de la pulpa}}$$

De esta fórmula se despejó la masa de la pulpa, que es la que nos interesa conocer, y se reemplazó los datos de densidad y volumen de la pulpa anteriormente mencionados, así que la masa de la pulpa es 1187,670 gr.

Para estimar la cantidad de material que se necesita, conociendo ya las características de la pulpa, se utiliza:

2.5

$$\% \text{ solidos} = \frac{\text{Masa solido}}{\text{Masa de la pulpa}}$$

Considerando que el porcentaje de solidos es del 30% y que la masa de la pulpa es de 11887.670 gr, calculados anteriormente, obtenemos que:

2.6

$$\text{Masa solido} = 0.30 * 1187,670 \text{ gr}$$

La masa del solido es de **356,302 gr**.

Con respecto a la masa del líquido, esta se la calcula de la resta entre la masa de la pulpa menos la masa del sólido. Así se obtiene que la masa del líquido es de **831,369 gr** o su equivalente en volumen es **831,369 ml**.

En resumen, de este apartado, las cantidades necesarias para la flotación son 356.302 gr de material y 831, 369 ml de agua, considerando estas cantidades se realizaron 7 flotaciones.

Dos aspectos de gran relevancia son que el sólido utilizado en flotación tiene una granulometría de pasante malla #100 y que el líquido utilizado es agua del sistema potable que tienen el laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas.

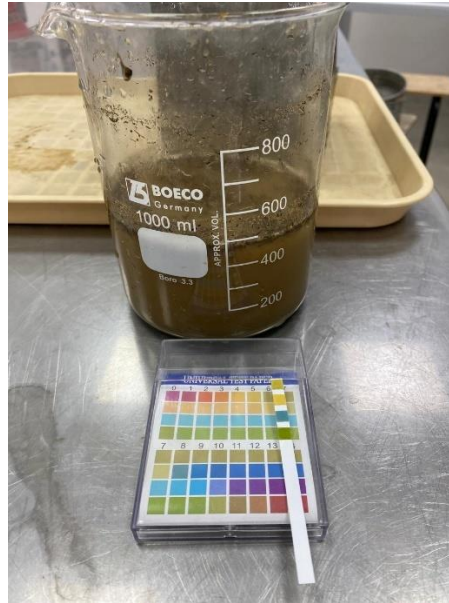
2.8.2 Potencial Hidrogeno (pH) de la muestra

Antes de iniciar con el proceso de flotación es necesario conocer cuál es el valor del pH de la pulpa, para saber si se requiere que este aumente hasta un valor deseado, que en este caso se busca trabajar con un pH de 11 teniendo en cuenta los minerales

presentes y reactivos disponibles. El valor de pH inicial de la muestra fue de 6 y con ayuda de tiras de papel indicador de pH, se puede comparar con la tabla del empaque de estas. Una vez alcanzado el valor escogido para la flotación, empiezan a correr los tiempos de acondicionamiento fijados.

Figura2.13

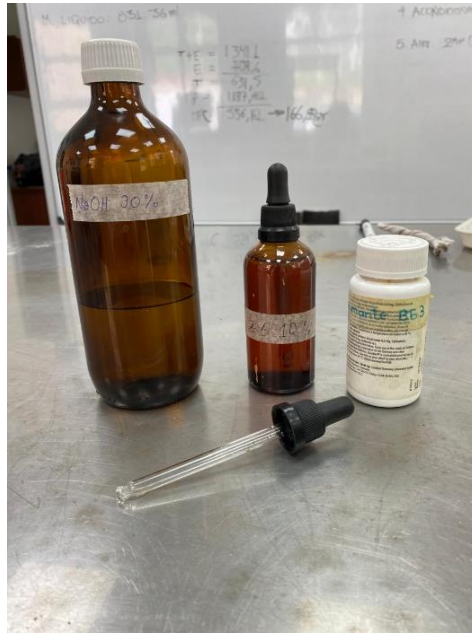
Medición de pH de la muestra



Nota. Medición de pH de la muestra mediante tiras. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.8.3 Dosificación de reactivos químicos

Figura 2.14
Reactivos químicos



Nota. Reactivos químicos utilizados en el proceso de flotación colectiva. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Regulador de pH: Para elevar el pH de la pulpa se agregaron 17 gotas de hidróxido de sodio y se esperó 2 minutos mientras se agitaba la pulpa para que se homogenicen de manera adecuada, esta cantidad fue suficiente para que la suspensión tenga un pH de 11 y así iniciar con el proceso de flotación.

Figura 2.15*Adicionamiento del regulador de pH*

Nota. Adicionamiento del hidróxido de sodio utilizado como regulador de pH.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Colector: El colector utilizado para flotación fue el Xantato amílico de Potasio Z-6, debido a la disponibilidad de este en el laboratorio de la Escuela de Minas. Este colector se encuentra con una solución de 20%, es decir en 50 ml de agua se disolvieron 10 gramos de colector. Para la esta flotación se consideró una concentración de 100 gr/ton de este colector, con esto definido se calcula la cantidad en gramos de colector en función de nuestra masa de sólido.

$$100 \text{ gr} \rightarrow 1000 \text{ Kg (1 ton)}$$

$$X \rightarrow 0,3563 \text{ Kg (Masa material)}$$

Despejando X, tenemos que se necesitan **0,03563 gr** de X. amílico de potasio Z-6. Sin embargo, al disponer del colector en estado líquido y al conocer la disolución podemos estimar la cantidad de colector en mililitros mediante:

$$10 \text{ gr} \rightarrow 50 \text{ ml}$$

$$0.03563 \text{ gr} \rightarrow X = 0.1782 \text{ ml}$$

Para comodidad al momento de agregar el colector, se estimó la cantidad a agregar en gotas, indicando cuantas gotas representan los mililitros que se necesitan. Esto se realizó con la siguiente relación:

$$1 \text{ ml} \rightarrow 35 \text{ gotas Z-6}$$

$$0.1782 \text{ ml} \rightarrow X = 6 \text{ gotas Z-6}$$

Figura 2.16

Adicionamiento del colector



Nota. Adicionamiento del Xantato amílico de Potasio Z-6 utilizado como colector.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Espumante: El espumante utilizado fue el ER-370 y, al igual que el colector, se seleccionaron por la existencia de este en los laboratorios. La dosificación escogida para la flotación fue de 250 ml/ton. Con base a esta dosificación se estimó la cantidad de espumante:

250 ml → 1000 Kg (1 ton)

X → 0,3563 Kg (Masa material)

Despejando la incógnita, se determinó que se necesita **0,0891 ml** de ER-370.

Esta cantidad en función del número de gotas se expresa de la siguiente manera:

1 ml → 35 gotas ER-370

0.0891 ml → X= **4 gotas ER-370**

Figura 2.17

Adicionamiento del espumante



Nota. Adicionamiento del espumante ER-370. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.8.4 Tiempo de acondicionamiento

El tiempo total de acondicionamiento para el proceso de flotación es de 14 minutos divididos de la siguiente manera:

Tabla 2.3*Distribución del tiempo de acondicionamiento en la flotación colectiva de sulfuros*

Condición	Tiempo en minutos
Regulación de pH	2 minutos
Adicionamiento del colector	10 minutos
Adicionamiento del espumante	2 minutos
Tiempo total de Acondicionamiento	14 minutos
Recolección de burbujas	2 minutos

Nota. Descripción de los tiempos individuales de acondicionamiento de los reactivos y condiciones de la flotación. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 2.18*Concentrado*

Nota. Recolección de concentrado de la celda de flotación. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.8.5 Resultados

Una vez realizados los procesos de flotación, se dividieron las muestras en concentrado y colas, las cuales fueron cuidadosamente preparadas mediante un proceso de secado completo al aire libre y posteriormente en un horno, asegurándose de eliminar por completo toda la humedad. Una vez secadas las muestras se las peso y se realizó el balance de masas obteniendo los siguientes resultados:

Figura 2.19

Secado de muestras



Nota. Recolección total de las muestras (7): las muestras de la derecha corresponden al concentrado y las de la izquierda a las colas. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

1. **A:** 2495.5 g
2. **C:** 909,7 g
3. **T:** 1585,8 g

Finalmente, se seleccionó la muestra del concentrado y se separaron 209.7 g, designados como "M1", para su posterior análisis en el laboratorio mediante absorción atómica.

2.9 Protocolo de flotación selectiva

Para el proceso de flotación selectiva se mantuvieron las mismas dosificaciones que la flotación primaria con la única diferencia de que se agregó un reactivo más. El reactivo agregado fue el sulfato de cobre, por lo que incremento el tiempo de acondicionamiento de la pulpa, pasando de 14 a 19 minutos.

Parámetros para la flotación colectiva

PARÁMETRO	INTERVALO	VALOR ESTABLECIDO
Porcentaje Solidos en la suspensión	15% - 30%	30%
Regulador de pH (Hidróxido de sodio)	9.5 - 11.5	11
Sulfato de cobre	5 – 150 (ml/ton)	90 (ml/ton)
Colector (X. amílico de Potasio Z6)	20 – 150 (gr/ton)	100 (gr/ton)
Espumante (ER-370)	100 – 250 (ml/ton)	250 (ml/ton)
Tiempo de acondicionamiento	10 – 25 (min)	19 (min)
Tiempo de recolección burbujas	2 – 15 (min)	2 (min)
Revoluciones de trabajo de la celda de flotación	900-1200 (rpm)	950 (rpm)

Nota. Descripción de los parámetros y reactivo usados en la flotación selectiva.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.9.1 Preparación de la pulpa para la flotación selectiva

Para realizar la flotación selectiva se consideró adecuado que la masa del sólido a flotar sea de 700 gr, recalando que esta cantidad de material es el concentrado resultante de la flotación colectiva sin contar con la cantidad separada para el análisis de absorción atómica. Con la masa del sólido ya definida, los porcentajes de sólidos y líquidos con los

que se trabajó son iguales a los de la flotación colectiva, es decir, 30% y 70% respectivamente.

Para calcular la cantidad de la masa de la pulpa con la que se trabajó se ayudó de la siguiente ecuación:

2.7

$$\% \text{ sólidos} = \frac{\text{Masa del sólido}}{\text{Masa de la pulpa}}$$

Reemplazando los datos ya conocidos obtenemos que:

2.8

$$0.30 = \frac{700 \text{ gr}}{\text{Masa de la pulpa}}$$

$$\text{Masa de la pulpa} = 2333.33 \text{ gr}$$

Conociendo los datos de la masa de la pulpa y masa del sólido, se puede calcular la masa del líquido, esta es la diferencia entre la masa de la pulpa menos la masa del sólido, obteniendo masa del líquido: 1633.33 gr o lo que es lo mismo **1633.33 ml de agua.**

En resumen, las cantidades necesarias para llevar cabo la flotación: 700 gr de material producto de la concentración de la flotación colectiva y 1633.33 ml de agua.

2.9.2 Dosificación de reactivos químicos para la flotación selectiva

Figura 2.20

Reactivos químicos



Nota. Reactivos químicos utilizados en el proceso de flotación colectiva. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Regulador de pH: Para que la pulpa alcance un valor de pH de 11, fue necesario agregar 34 gotas de hidróxido de sodio y luego se esperó 2 minutos para que la mezcla se homogenice de manera correcta.

Figura 2.21*Adicionamiento del regulador de pH*

Nota. Adicionamiento del hidróxido de sodio utilizado como regulador de pH.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Depresor: Para depresar la pirita, y por la disponibilidad de este en el laboratorio de la escuela de minas, se utilizó el sulfato de cobre CuSO_4 . Este depresor cuenta con una disolución del 10%, es decir se disolvieron 3gr del mismo en 30 ml de agua y como ya se mencionó la dosificación utilizada fue de 90 gr/ton.

$$90 \text{ gr} \rightarrow 1000 \text{ Kg (1 ton)}$$

$$X \rightarrow 0.7 \text{ Kg}$$

Despejando tenemos que fue necesario agregar **0.0630 gr** de sulfato de cobre. Ahora si bien se conoce gracias a la disolución, que en 30 ml de agua existen 3 gr de CuSO_4 se estimó la cantidad en volumen:

$$30 \text{ gr} \rightarrow 50 \text{ ml}$$

$$0.0639 \text{ gr} \rightarrow X = \mathbf{0.630 \text{ ml de CuSO}_4}$$

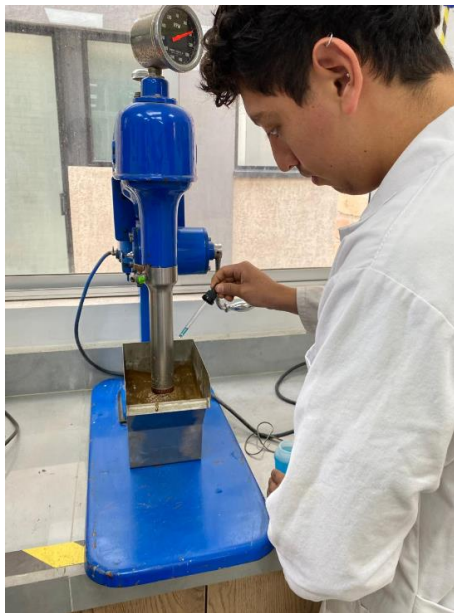
Y para estimar la cantidad en número de gotas, aplicamos la siguiente relación:

$$\begin{array}{rcl} 36 \text{ gotas de CuSO}_4 & \rightarrow & 1 \text{ ml} \\ X & \rightarrow & 0.630 \text{ ml} \end{array}$$

Entonces se obtuvo que, al despejar la relación matemática, era necesario agregar 23 gotas de CuSO_4 .

Figura 2.22

Adicionamiento del sulfato de cobre



Nota. Adicionamiento del sulfato de cobre utilizado como depresor de la pirita.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Colector: El colector utilizado fue el mismo de la flotación colectiva, lógicamente al incrementar la cantidad de sólidos, la cantidad del Xantato amílico de Potasio Z-6 también incrementó.

$$\begin{array}{rcl} 100 \text{ gr} & \rightarrow & 1000 \text{ Kg (1 ton)} \\ X & \rightarrow & 0.7 \text{ Kg} \end{array}$$

Entonces la cantidad de colector que se utilizó fue de **0.070 gr**. De igual manera se estimó la cantidad en unidad de volumen gracias a la dosificación, en consecuencia, tenemos que:

$$10 \text{ gr} \rightarrow 50 \text{ ml}$$

$$0.070 \text{ gr} \rightarrow X = \mathbf{0.350 \text{ ml X.-Z6}}$$

Y como ya es de conocimiento que 35 gotas del X.-Z6 caben en 1 ml, entonces al hacer una regla de tres simple, se obtuvo que fue necesaria agregar **12 gotas de X.-6**.

Figura 2.23

Adicionamiento del colector



Nota. Adicionamiento del Xantato amílico de Potasio Z-6 utilizado como colector.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Espumante: Se mantuvo el mismo espumante ER-370 con su dosificación.

$$250 \text{ ml} \rightarrow 1000 \text{ Kg (1 ton)}$$

$$X \rightarrow 0.7 \text{ Kg}$$

De la relación matemática anterior se obtuvo que se necesitó **0.175 ml de Er-370**. Y para expresar esta cantidad en número de gotas aplicamos la siguiente operación:

$$1 \text{ ml} \rightarrow 35 \text{ gotas de ER-370}$$

$$0.1750 \text{ ml} \rightarrow \mathbf{X= 8 \text{ gotas de ER-370}}$$

Figura 2.24

Adicionamiento del espumante



Nota. Adicionamiento del espumante ER-370. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.9.3 *Tiempo de acondicionamiento para la flotación selectiva*

Distribución del tiempo de acondicionamiento en la flotación colectiva de sulfuros

Condición	Tiempo en minutos
Regulación de pH	2 minutos
Acondicionamiento del Sulfato de cobre	5 minutos
Adicionamiento del colector	10 minutos
Adicionamiento del espumante	2 minutos
Tiempo total de Acondicionamiento	19 minutos
Recolección de burbujas	2 minutos

Nota. Descripción de los tiempos individuales de acondicionamiento de los reactivos y condiciones de la flotación selectiva. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

2.9.4 *Resultados*

Una vez concluida la flotación selectiva, se repitió el mismo proceso anterior, separando dos corrientes de concentrado, donde se encuentra la calcopirita, y en las colas, la pirita, seguido del proceso de secado, pesado y balance de masas obteniendo los siguientes resultados:

Figura 2.25

Secado de muestras



Nota. Recolección total de las muestras (4): las muestras de la derecha corresponden al concentrado y las de la izquierda a las colas. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

1. **A:** 700 g
2. **C:** 272,2 g
3. **T:** 427,8

Por último, se pesaron y separaron 100 g de cada corriente y se les asignó el nombre "M2" para la corriente de concentrado y "M3" para la corriente de colas para ser enviadas a un laboratorio donde serán sometidas a análisis por absorción atómica.

3 CAPITULO III: Resultados, Conclusiones y Recomendaciones

3.1 Análisis de Resultados

Mediante los análisis de absorción atómica se pudieron obtener los siguientes tenores para las 3 muestras enviadas:

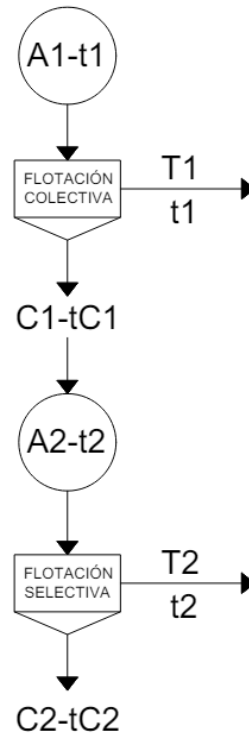
Tabla 3.1
Análisis mineralógico de las muestras: M1, M2 Y M3

N°	CODIGO DE MUESTRA	% Cu Cobre
1	M1	2,3572%
2	M2	6,0461%
3	M3	0,0100%

Nota: Análisis mineralógico de las muestras por absorción atómica.

3.2 Balance de Masas

Teniendo conocimiento de los tenores de las muestras enviadas al laboratorio, es posible calcular los tenores faltantes en las corrientes de concentración por balance de masas mediante el proceso de flotación, utilizando los índices metalúrgicos resumidos en el siguiente esquema.

Figura 3.1*Diagrama de flujo del proceso de flotación*

Nota: Diagrama del balance de masas y tenores en base a los análisis de laboratorio.

Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Tabla 3.2*Balance de Masas y Tenores*

Índice Metalúrgico	Flotación Colectiva	Flotación Selectiva
A	2495.5 g	700 g
ta	0,8656%	2,3572%
C	909,7 g	272,2 g
tc	6,0461%	6,0461%
T	1585,8 g	427,8
tt	0,0100%	0,0100%

Nota: Balance de masas y tenores en base a los análisis de laboratorio. Realizado por:

Mora y Reiban (2024).

3.3 *Recuperación Mineral Alcanzada*

La recuperación mineral se basó en los análisis de laboratorio previamente realizados y en el balance de masas. Estos análisis permitieron determinar los tenores de los minerales presentes en cada etapa del proceso de flotación, proporcionando una visión detallada de la distribución de los minerales valiosos como la pirita depresada. Los tenores obtenidos reflejan la proporción de minerales valiosos en las distintas corrientes del proceso: la alimentación inicial, el concentrado resultante y las colas desechadas. Este enfoque integral asegura que la evaluación de la eficiencia del proceso de flotación sea precisa y confiable, permitiendo identificar oportunidades para optimizar y mejorar el rendimiento general del proceso metalúrgico. A continuación, se presentan los tenores específicos obtenidos en cada una de las corrientes mencionadas.

Finalmente se pudo calcular la recuperación global (R) y la razón de enriquecimiento (RE):

- **R:** 76.19%
- **RE:** 6.98%

3.4 *Conclusiones*

En el análisis del proceso de flotación aplicado a una relavera para la recuperación de cobre, se implementaron dos etapas de flotación: una colectiva y otra selectiva. Los resultados obtenidos fueron interesantes, indicando una recuperación del 76.19% y una razón de enriquecimiento de 6.98%.

Caracterización Mineral

La caracterización de la relavera se realizó de manera efectiva mediante la extracción de muestras y la realización de diversos análisis de laboratorio, lo que permitió identificar los minerales presentes. Este conocimiento detallado de la

composición mineralógica del depósito abre la posibilidad de implementar, además de los procesos de flotación teniendo en cuenta la implementación de nuevos reactivos, otras alternativas para mejorar la recuperabilidad de los minerales presentes. Estas alternativas podrían incluir técnicas avanzadas de separación y procesamiento posteriormente expuestas en este trabajo que maximicen la recuperación y optimicen el rendimiento general del proyecto.

Recuperación del Cobre

La recuperación del 76.19% demuestra que el proceso de flotación fue bastante eficiente, logrando extraer una gran proporción del cobre presente en la relavera. Este alto porcentaje de recuperación indica que las condiciones de flotación (incluyendo reactivos, pH, y tiempo de residencia) fueron óptimas para maximizar la extracción del mineral valioso.

Razón de Enriquecimiento

La razón de enriquecimiento de 6.98% significa que la concentración de cobre en el concentrado final es casi siete veces mayor que en la alimentación inicial. Esto es un indicador positivo de la efectividad del proceso, reflejando una considerable mejora en la pureza del mineral recuperado.

Flotación Colectiva

En la etapa de flotación colectiva, donde se busca separar los sulfuros de algunos silicatos presentes en la muestra, se logró una base sólida de recuperación. Este paso inicial es crucial para maximizar la cantidad de mineral recuperado antes de proceder a la flotación selectiva, donde se refina aún más la calidad del concentrado.

Flotación Selectiva

La flotación selectiva permitió una mayor refinación del concentrado de cobre, eliminando impurezas y otros minerales no deseados. Esta etapa es esencial para alcanzar el nivel de enriquecimiento observado, garantizando que el cobre recuperado sea de alta calidad.

Impacto Ambiental

La relavera sigue siendo un pasivo ambiental significativo, sin que hasta la fecha se hayan implementado tratamientos efectivos para frenar la contaminación en el área de San Bartolomé. La eficiente recuperación y enriquecimiento del cobre extraído de la relavera pueden desempeñar un papel crucial en la reducción del impacto ambiental. Al tratar estos residuos, no solo se facilita la recuperación de cobre, sino que también se abre la oportunidad de investigar y aplicar métodos para reducir la presencia de otros contaminantes en el depósito.

Además, al recuperar una mayor proporción de cobre de la relavera, se disminuye la cantidad de residuos que permanecen en el medio ambiente, lo que contribuye a un proceso más sostenible. Esta estrategia no solo mejora la gestión de los desechos mineros, sino que también ayuda a mitigar los riesgos ambientales asociados con la relavera mejora de la sostenibilidad ambiental en la región de San Bartolomé.

3.5 Recomendaciones

Conocer las características físicas y químicas de la especie mineral que se va a concentrar, además de apoyarse referencias teóricas-prácticas similares, garantiza un proceso de flotación eficiente ya que con esto se puede crear un escenario de flotabilidad adecuado y controlado, en donde las dosificaciones de los reactivos

utilizados y la preparación del mineral sean las correctas en cuanto a calidad y cantidad.

La disponibilidad de elección entre reactivos químicos e instrumentos de laboratorio para el proceso de concentración mineral influye en los resultados de la separación mineral, pues genera libertad de escoger un reactivo ideal para un mineral específico. Por eso pone a consideración, y a la vez es trascendental, que la universidad facilite las comodidades y los componentes prácticos necesarios para llevar a cabo trabajos experimentales de calidad, que en la mayoría de las situaciones buscan brindar alternativas de solución a ciertas problemáticas.

Incrementar los límites de investigación sobre un tema provoca que surjan nuevas alternativas en cuanto a técnicas, medidas y soluciones respecto al tema tratado. El escenario de flotación planteado en este documento se limita a una flotación selectiva en la celda tipo Denver, por lo que realizar otras prácticas e investigaciones resulta conveniente para buscar resultados más eficientes y de alto rendimiento que los obtenidos. Para ejemplificación, se podría realizar un circuito interactivo de flotación entre la flotación Rougher (R), flotación Cleaner (C) y flotación Scavenger (S), es decir un sistema de flotación RCS para la concentración mineral de la relavera.

Las condiciones de intemperie bajo las que se encuentra la relavera de San Bartolomé incrementan la liberación de contaminantes con el transcurso de tiempo causando una afectación a la zona y a la integridad de la minería responsable. Por eso es muy importante aplicar medidas remediadoras en la zona, que pueden incluir la remediación ambiental de este pasivo ambiental mediante el retratamiento mineral de esta.

4 Bibliografía

Alexander, S. (1963). FLOTACION DE MINERALES. Concepción: Universidad de Concepción.

Argentina.gob.ar. (2023, Noviembre 28). Absorción atómica. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/cnea/cab/quimica/absorcion-atmica#:~:text=La%20absorci%C3%B3n%20at%C3%B3mica%20es%20una,productos%20qu%C3%ADmicos%2C%20aleaciones%20y%20fundiciones.>

Blanco, E. A. (2014). BLOQUE I - CAPÍTULO 6. CONCEPTO DE CONCENTRACIÓN - OPERACIONES AUXILIARES. En E. A. Blanco, Tecnología Mineralúrgica (pág. 7). España: UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.

Bustamante, O., Gaviria, A., & Restrepo, O. (2008a). Concentración de minerales. Instituto de Minerales CIMEX, 17(34).

Bustamante, O., Gaviria, C., & Restrepo, J. (2008b). CONCENTRACIÓN DE MINERALES [Universidad Nacional de Colombia].

<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/doc13.pdf>

Castro, S., & García, J. A. (2012). FLOTACIÓN: Fundamentos y Aplicaciones. Concepción: Universidad de Concepción Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Metalúrgic.

Herrmann y Zappettini, E. (2014). Recursos minerales, minería y medio ambiente. Servicio Geológico Minero Argentino, 173.

Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INAPI). (2021). Informe de Dominio Público N°122 - Recuperación de metales valiosos desde residuos mineros (Edición 122). Instituto Nacional de Propiedad Industrial.

Malvern Panalytical. (2020, Agosto 9). Difracción de rayos X (XRD). Obtenido de malvernpanalytical.com:

<https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction#dispersi%C3%B3nderayosx>

Martinez, R. (2020). Análisis instrumental : Espectrometría de Absorción Atómica (EAA). In Universitat Politècnica de València.

Mulshaw, S. C., & Puig, C. A. (1994). Silver mineralization at San Bartolomé, Azuay, Ecuador. In Mining Latin America / Minería Latinoamericana: Challenges in the mining industry / Desafíos para la industria minera (pp. 165–180). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1216-1_12

Perales Agüera, D. A. (2011). Tema 12. Introducción a la flotación. En U. P. CARTAGENA, Tecnología Mineralúrgica, diciembre 2011 (pág. 15). CARTAGENA: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA. Obtenido de Tecnología Mineralúrgica, diciembre 2011.

Universidad Técnica Particular de Loja. (s.f.). DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Obtenido de investigacion.utpl.edu.ec:

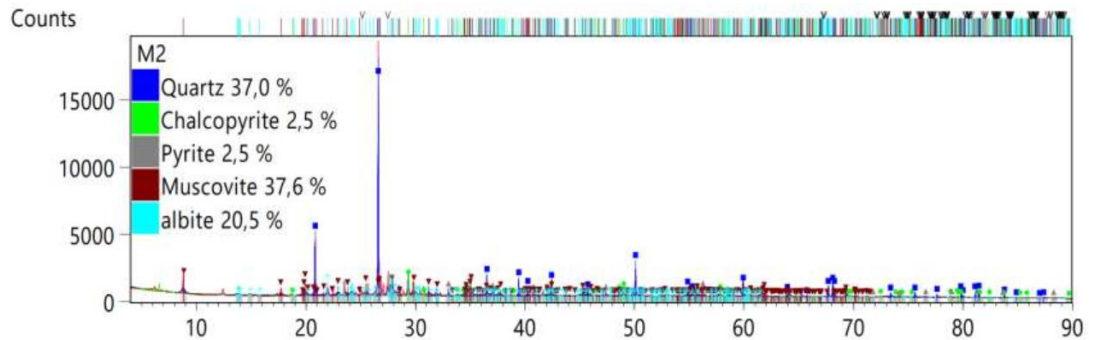
<https://investigacion.utpl.edu.ec/laboratorios/rayosx#:~:text=Este%20laboratorio%20permite%20la%20caracterizaci%C3%B3n,cuantitativo%20y%20cualitativo%20de%20muestras.>

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). Mineral Processing Technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, by Barry A. Wills, Tim Napier-Munn. October, October.

5 ANEXOS

Figura 5.1

Difractograma de la muestra M1



Nota. Difractograma de la muestra M1 realizada por difracción de rayos X. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 5.2

Obtención de las muestras



Nota. Extracción de las muestras en la relavera. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 5.3
Molienda de la muestra



Nota. Molienda de la muestra realizada en la Universidad del Azuay. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 5.4
Tamizaje de la muestra



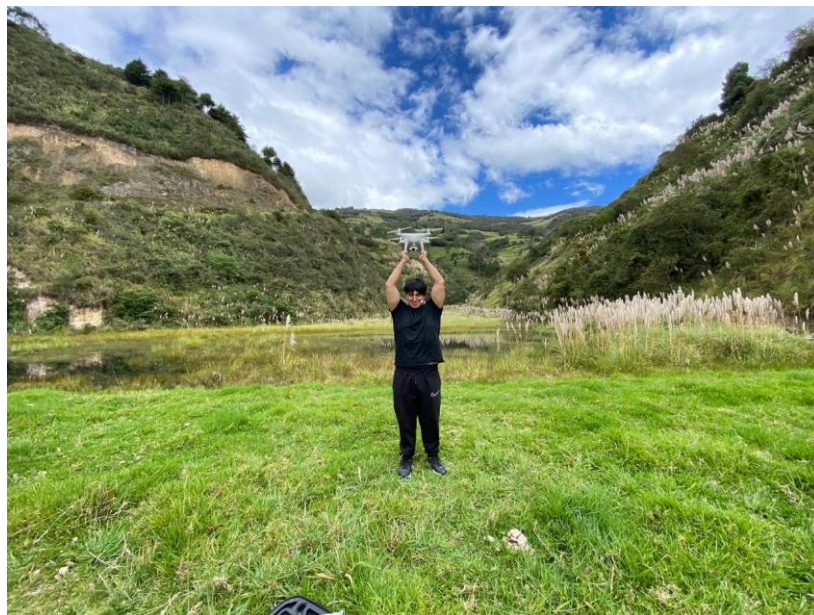
Nota. Tamizaje de la muestra realizada en la Universidad del Azuay. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 5.5
Muestras resultantes de la flotación



Nota. Muestras resultantes de la flotación enviadas al laboratorio. Realizado por: Mora y Reiban (2024).

Figura 5.6
Medición topográfica



Nota. Medición topográfica mediante un dron. Realizado por: Mora y Reiban (2024).