

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**RECUPERACION DE COBRE POR EL PROCESO DE FLOTACION A PARTIR DE
MINERAL SULFURADO DE COBRE DEL YACIMIENTO CALVARIO,
COTABAMBAS, APURIMAC
(Investigación Tecnológica)**

PRESENTADO POR:

Br. AUGUSTO HUALLPAYUNCA QUISPE

Br. MARCELO CARO PEREZ

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

ING. PORFIRIO CARRASCO TAPIA

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: RECUPERACION DE COBRE POR EL PROCESO DE FLOTACION A PARTIR DE MINERAL SULFURADO DE COBRE DEL YACIMIENTO CALVARIO, COTABAMBAS, APURIMAC

Presentado por: HUALLPAYUNCA GUISSPE AUGUSTO DNI N° 70339527

presentado por: CARO PEREZ MARCELO DNI N°: 70438993

Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 5 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 10 de Abril de 2025


Firma
Post firma Rafael Coronado Tapia

Nro. de DNI 24002881

ORCID del Asesor 0000-0002-4360-9866

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:447455256

Augusto Hullpayunca Q. y Marce

Recuperación de cobre por el proceso de flotación del yacimiento Calvario.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:447455256

Fecha de entrega

9 abr 2025, 4:18 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 abr 2025, 4:23 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

Recuperación de cobre por el proceso de flotación del yacimiento Calvario.pdf

Tamaño de archivo

3.7 MB

109 Páginas

18.910 Palabras

107.030 Caracteres

5% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
- ▶ Quoted Text
- ▶ Cited Text
- ▶ Small Matches (less than 12 words)

Top Sources

- 3%  Internet sources
- 0%  Publications
- 4%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Hidden Text**
3394 suspect characters on 61 pages
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

DEDICATORIA

Dedico esta obra al hogar que siempre llevo conmigo,
a la familia cuyas raíces se hunden profundas en mis recuerdos.
A mis padres Agustin Huallpayunca “esfuérate por ser feliz” y Francisca
Quispe, que me enseñaron que el conocimiento es una luz que nunca se
apaga,
y a mis hermanos Marco Antonio y Gladys, que compartieron conmigo el
camino lleno de risas y aprendizaje.
Cada palabra aquí plasmada es un eco de su amor y sabiduría.
A través de los años y las páginas, mi gratitud hacia ustedes solo ha crecido.
Augusto Huallpayunca Quispe

A mis padres quienes fueron el motor de mi vida que impulsaron a
convertirme en alguien mejor cada día.
A Shanda, mi querida esposa que jamás dejo de agarrar mi mano y
acompañarme en todo este camino.
A mis hermanos por darme su apoyo y permitirme ser un ejemplo para ellos.
Y a mi pequeño Enzo, por quien trato de ser mejor todos los días y es mi más
grande motivación.
A todos ustedes, gracias por ser parte de esta gran etapa de mi vida, un gran
sacrificio y esfuerzo que vengo desarrollando. Les dedico este logro porque
son lo más importante en mi vida y de quienes obtengo esa energía y apoyo
incondicional por tanto tiempo. Los amo.

Marcelo Caro Pérez

AGRADECIMIENTO

Agradecemos profundamente a la Universidad y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica por su valioso apoyo y por proporcionarnos los recursos indispensables para la realización de esta investigación. Las instalaciones y el equipamiento de laboratorio que se nos facilitaron fueron esenciales para realizar las pruebas y experimentos con los estándares de precisión y rigurosidad que este estudio requería.

De manera especial, queremos agradecer al ingeniero Porfirio Carrasco, nuestro asesor, por su dedicación y compromiso incondicional. Sus conocimientos en el área de la metalurgia y su orientación técnica nos permitieron enfrentar cada desafío experimental con una perspectiva crítica y analítica. Su paciencia y constante disposición para guiarnos y resolver nuestras dudas fueron una fuente de inspiración y aprendizaje invaluable a lo largo de todo este proceso.

RESUMEN

La investigación presentada se enfoca en lograr una recuperación de cobre máxima a partir del mineral sulfurado de cobre del yacimiento Calvario Cotabambas mediante el uso de los reactivos Z-6 (como colector primario), A-404 (colector secundario) y D-250 (espumante). Para la experimentación se extrajo 60 kg de mineral para los respectivos análisis químicos y mineralógico, posteriormente se corrieron las pruebas de flotación. Se realizaron 11 experimentos con dos niveles en las variables independientes, reactivo Z-6 (28.41 – 39.77 g/Tn), reactivo A-404 (34.09 – 56.82 g/Tn) y granulometría (41.90 – 59.99% -200 Malla) para conseguir la máxima recuperación como variable dependiente. Las pruebas experimentales realizadas indican que para obtener una máxima recuperación de cobre se debe priorizar como variables de impacto a la granulometría, la óptima liberación de partícula valiosa incrementa de gran manera el porcentaje de recuperación de cobre, el colector primario Z-6. Ajustando estas variables se logró levantar la recuperación de cobre de 82.67% a 91.20%. Por lo tanto, se puede concluir en que la mayor recuperación de cobre obtenida 91.20% con una dosis de 39.77 g/Tn de colector Z-6 igualmente con una dosis de 34.09 g/Tn de colector A-404 y 59.99% -200 malla en tamaño de partícula.

Palabras Clave: Colectores, granulometría, recuperación de cobre, flotación.

ABSTRACT

The presented research focuses on achieving maximum copper recovery from the copper sulfide ore of the Calvario Cotabambas deposit through the use of reagents Z-6 (as primary collector), A-404 (secondary collector) and D-250 (foaming agent). For the experimentation, 60 kg of mineral was extracted for the respective chemical and mineralogical analysis, subsequently the flotation tests were run. 11 experiments were carried out with two levels in the independent variables, reagent Z-6 (28.41 - 39.77 g / Tn), reagent A-404 (34.09 - 56.82 g / Tn) and granulometry (41.90 - 59.99% -200 Mesh) to achieve the maximum recovery as a dependent variable. Experimental tests indicate that particle size distribution should be a key impact variable for maximum copper recovery. Optimal particle release significantly increases the copper recovery percentage in the Z-6 primary collector. Adjusting these variables increased copper recovery from 82.67% to 91.20%. Therefore, it can be concluded that the highest copper recovery was 91.20% with a dosage of 39.77 g/ton in the Z-6 collector, and 59.99% with a 200 mesh particle size.

Keywords: Collectors, particle size distribution, copper recovery, flotation.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I.....	1
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 FORMULACIÓN DE PROBLEMAS	2
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.4 RELEVANCIA SOCIAL	3
1.5 RELEVANCIA TECNOLÓGICA	3
1.6 UTILIDAD METODOLÓGICA	3
1.7 OBJETIVOS	3
1.7.1 Objetivo general.....	3
1.7.2 Objetivos específicos	3
CAPITULO II	5
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 ANTECEDENTES NACIONALES E INTERNACIONALES	5
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	5
2.1.2 Antecedentes nacionales	5
2.1.3 Antecedentes locales	6
2.2 DEFINICIÓN DE FLOTACIÓN POR ESPUMA	6
2.3 PRINCIPIO DE FLOTACIÓN POR ESPUMA	7
2.3.1 Hidrofobicidad	7
2.3.2 Hidrofilicidad	8
2.4 FACTORES DEL PROCESO DE FLOTACIÓN POR ESPUMAS	8
2.4.1 Factores químicos	8
2.4.2 Factores físicos.....	9
2.4.3 Factores operacionales	9
2.5 FLOTACIÓN DE SULFUROS DE COBRE.....	9
2.6 CONTACTO PARTÍCULA/BURBUJA.....	10
2.6.1 Características de las distintas interfaces	10
2.6.2 Punto de carga cero	12
2.6.3 Angulo de contacto	13
2.7 IMPORTANCIA DE LOS REACTIVOS DENTRO DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN	14
2.7.1 Clasificación de reactivos de flotación	14
2.8 CINÉTICA DE FLOTACIÓN	20
2.9 CELDAS DE FLOTACIÓN	21

2.9.1	Función de las celdas de flotación	21
2.9.2	Celda de laboratorio	22
CAPITULO III.....		23
3	HIPOTESIS Y VARIABLES.....	23
3.1	HIPÓTESIS	23
3.1.1	Hipótesis general.....	23
3.1.2	Hipótesis específica.	23
3.2	VARIABLES	23
3.2.1	Variables dependientes	23
3.2.2	Variables independientes	23
CAPITULO IV		24
4	METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.....	24
4.1	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	24
4.2	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	24
4.3	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	24
4.4	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
4.5	UBICACIÓN DEL YACIMIENTO.....	24
4.6	POBLACIÓN	25
4.7	MUESTRA.....	25
4.8	TÉCNICAS DE SELECCIÓN DE MUESTRA	25
4.9	MÉTODOS Y HERRAMIENTAS PARA LA RECOPIACIÓN DE DATOS	26
4.10	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS	27
4.11	TÉCNICA DE PROCEDIMIENTOS DE ANÁLISIS DE DATOS	27
4.12	DIAGRAMA DE BLOQUE DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	27
CAPITULO V.....		29
5	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	29
5.1	MÉTODO DE MUESTREO DEL YACIMIENTO.....	29
5.1.2	Análisis granulométrico	30
5.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO.....	31
5.2.1	Ley de cabeza del mineral.....	31
5.2.2	Prueba de molienda análisis granulométrico	32
5.2.3	Aplicación del método de mínimos cuadrados	37
5.2.4	Gravedad específica del mineral	38
5.3	PRUEBA CINÉTICA DE FLOTACIÓN	40
5.3.1	Equipo y reactivos utilizados	40
5.3.2	Procedimiento para cinética de flotación.....	40
5.4	DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA PRUEBA DE FLOTACIÓN	44
5.4.1	Diseño factorial.....	45
5.5	PROCEDIMIENTO DE FLOTACIÓN	46
5.5.1	Acondicionamiento del mineral.....	46

5.5.2	Cálculo de porcentaje de sólidos.....	46
5.5.3	Preparación de reactivos y secuencia operativa.....	47
5.5.4	Recolección de espumas y concentrados	47
5.5.5	Separación y recolección del concentrado	48
5.6	DETERMINACIÓN DE LEY DE CU EN EL CONCENTRADO Y RELAVE	49
5.6.1	Resultados del análisis químico	49
5.7	BALANCE METALÚRGICO	50
CAPITULO VI.....	54	
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	54
6.1	DISEÑO FACTORIAL 2^3	54
6.2	ANÁLISIS DEL DISEÑO FACTORIAL 2^3 CON RÉPLICAS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL	56
6.2.1	Variables consideradas en el diseño factorial	57
6.2.2	Análisis de efectos de las variables.....	58
6.3	EVALUACIÓN DE LA SIGNIFICANCIA DE EFECTOS EN UN DISEÑO FACTORIAL MEDIANTE ANÁLISIS DE VARIANZA.....	66
6.4	EVALUACIÓN DE LOS RESIDUOS	69
6.5	MODELO DE REGRESIÓN EN UNIDADES NO CODIFICADAS	70
7	CONCLUSIONES.....	77
8	RECOMENDACIONES	78
9	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	79
ANEXOS.....	80	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mecanismo de flotación	7
Figura 2.2 Esquema contacto partícula/ burbuja	10
Figura 2.3 Esquema de elementos de flotación	11
Figura 2.4 Punto de carga cero	13
Figura 2.5 Clasificación de los colectores	14
Figura 2.6 Xantato como colector primario para sulfuros de cobre	15
Figura 2.7 Comparación entre xantato y ditiofosfato	17
Figura 2.8 Clasificación de los modificadores.....	19
Figura 2.9 Funcionamiento de las celdas de flotación.....	21
Figura 2.10 Esquema de una celda de flotación nivel laboratorio.....	22
Figura 4.1 Vista panorámica del yacimiento Calvario	25
Figura 4.2 Diagrama de Bloques	28
Figura 5.1 Mineralización del yacimiento Calvario	31
Figura 5.2 Curva de análisis granulométrico para 8 minutos de molienda.....	33
Figura 5.3 Curva de análisis granulométrico para 10 minutos de molienda.....	34
Figura 5.4 Curva de análisis granulométrico para 12 minutos de molienda.....	35
Figura 5.5 Curva cinética de molienda: relación entre duración de molienda y % pasante en tamiz 200.....	36
Figura 5.6 Curva de recuperación acumulada en función del tiempo de flotación	44
Figura 5.7 Variación de la ley de Cu en el concentrado a lo largo de los ensayos.....	49
Figura 5.8 Evolución de la recuperación de cobre (%) a lo largo de los ensayos	50
Figura 6.1 Representación gráfica de los niveles de factores en un diseño factorial 2^3	56
Figura 6.2 Diagrama de pareto de los efectos (la respuesta es % recuperación; $\alpha = 0.05$)	58
Figura 6.3 Gráfica normal de los efectos (la respuesta es % recuperación; $\alpha = 0.05$).....	62
Figura 6.4 Gráfica de cubos del % de recuperación	63
Figura 6.5 Efectos principales de Z-6, A-404 y % de -200M sobre la recuperación de cobre	64
Figura 6.6 Interacción para % recuperación (medias ajustadas)	65
Figura 6.7 Exploración gráfica de residuos: Claves para el porcentaje de recuperación	69
Figura 6.8 Gráfica de superficie de % recuperación vs. Z-6; A-404	71
Figura 6.9 Gráfica de contorno de % recuperación vs. Z-6; A-404.....	72
Figura 6.10 Gráfica de superficie de % recuperación vs. Z-6; granulometría.....	73

Figura 6.11 Gráfica de contorno de % recuperación vs. Z-6; granulometría	74
Figura 6.12 Gráfica de superficie de % recuperación vs. granulometría; A-404	75
Figura 6.13 Gráfica de contorno de % recuperación vs. granulometría; A-404.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Relación de recuperación de mineral de Cu y concentración de xantato	16
Tabla 2.2 Resumen exceso - defectos sobre espumantes, colectores, modificadores.....	19
Tabla 5.1 Materiales y herramientas para el muestreo.....	29
Tabla 5.2 Herramientas, herramientas y materiales para el análisis granulométrico.....	30
Tabla 5.3 Equipos y materiales para la molienda y análisis granulométrico	32
Tabla 5.4 Análisis granulométrico a los 8 min	33
Tabla 5.5 Análisis granulométrico a los 10 min	34
Tabla 5.6 Análisis granulométrico a los 12 min	35
Tabla 5.7 Resultados de molienda y % pasante en tamiz 200	36
Tabla 5.8 Cálculo de molienda y pasante en malla 200.....	37
Tabla 5.9 Relación entre % pasante en malla 200 y tiempo de molienda.....	38
Tabla 5.10 Herramientas, materiales para gravedad específica	38
Tabla 5.11 Determinación de la gravedad específica del mineral	39
Tabla 5.12 Equipos y reactivos para la prueba de flotación	40
Tabla 5.13 Parámetros de molienda.....	41
Tabla 5.14 Parámetros de acondicionamiento y flotación	41
Tabla 5.15 Reactivos y dosificación para la prueba de flotación.....	42
Tabla 5.16 Resultados de flotación: distribución de peso, ley y recuperación de cobre por producto	42
Tabla 5.17 Cálculos de tiempo de flotación y recuperación acumulada de cobre con transformación de variables	43
Tabla 5.18 Niveles de dosificación y granulometría en el diseño experimental.....	45
Tabla 5.19 Condiciones de dosificación y granulometría en ensayos de flotación	45
Tabla 5.20 Diseño experimental: escalas natural y codificada con respuestas.....	46
Tabla 5.21 Resultados de ensayos de flotación.....	49
Tabla 5.22 Resultados de ensayos: peso, ley y recuperación de Cu en concentrado y relave	50
Tabla 5.23 Condiciones operativas para flotación	51
Tabla 5.24 Balance metalúrgico pruebas de flotación	52
Tabla 6.1 Codificación de factores y etiquetas binarias para las corridas experimentales	56
Tabla 6.2 Análisis de varianza generado por MINITAB 19	59
Tabla 6.3 Indicadores de ajuste del modelo de regresión	61

Tabla 6.4 Tabla ANOVA: desglose de suma de cuadrados, grados de libertad y estadísticos F para factores e interacciones	67
Tabla 6.5 Resultados del ANOVA: suma de cuadrados, grados de libertad, y significancia de factores e interacciones	68

SIGLAS Y ABREVIATURAS

KPI's	:	Indicadores clave de desempeño
TMSD	:	Toneladas Métricas Secas Diarias
bar	:	Medida de presión de un fluido
m.s.n.m.	:	Metros Sobre el Nivel del Mar
m	:	Metros
mm	:	Milímetros
µm	:	Micrómetros
Pa	:	Pascal
s	:	Segundo
A-404	:	Aeropromotor 404
D-250	:	Dowfroth 250
Z-6	:	Xantato amilico de potasio
Cu	:	Cobre
Cusac	:	Cobre soluble

INTRODUCCIÓN

En el Perú, la minería artesanal desempeña un papel crucial en la economía de diversas regiones, especialmente en Apurímac, donde se encuentran yacimientos ricos en cobre. Sin embargo, una de las principales limitaciones de esta actividad es la falta de estudios metalúrgicos que permitan comprender el comportamiento del mineral en procesos de concentración, lo que genera incertidumbre sobre su calidad y valor comercial. Un claro ejemplo de esta situación es el yacimiento Calvario, ubicado entre Cotabambas y Antabamba a una altitud de 3200 m.s.n.m., el cual pertenece a la **Asociación de Mineros Artesanales "Calvario"** (RUC: 20490983831). En este yacimiento, los mineros artesanales extraen y comercializan el mineral sin procesarlo. No obstante, la falta de información detallada sobre las características metalúrgicas del mineral puede afectar su valorización y limitar su potencial de comercialización. Ante esta problemática, es fundamental evaluar su comportamiento en procesos de flotación, dado que este es el método más utilizado para la concentración de minerales sulfurados de cobre. Factores como la granulometría y la dosificación de reactivos desempeñan un papel clave en la eficiencia del proceso, y su análisis permitirá comprender mejor el potencial de recuperación del cobre en este yacimiento. El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la recuperación de cobre para alcanzar recuperaciones superiores al 90%. Para ello, se realizaron pruebas metalúrgicas utilizando los reactivos Z-6 (colector), A-404 (modificador) y D-250 (espumante) en distintas dosificaciones, además de analizar el impacto del tamaño de partícula en el rendimiento del proceso. A través de estas pruebas experimentales, se busca establecer un conjunto de condiciones operativas que proporcionan información clave para futuros estudios.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1 Situación problemática

El yacimiento Calvario-Cotabambas, Apurímac, se encuentra en plena exploración, cuenta con alto potencial de extracción de mineral de cobre de naturaleza sulfurada, su mineralogía varía entre la calcopirita, bornita y covelina. Al no haber sido estudiado metalúrgicamente en un laboratorio, no se cuenta con la información de los parámetros para su proceso. Por lo tal motivo, se realizó pruebas metalúrgicas de molienda y flotación con el uso del reactivo colector xantato amílico de potasio (Z-6) y Aeropromotor 404 (A-404).

Al lograr una máxima recuperación de Cu por el proceso de flotación mediante el uso de Z-6 y A-404. Se determinó la dosificación adecuada de Z-6 y A-404; y, de igual manera, la granulometría más eficaz que permita un mayor grado de liberación del mineral para la flotación, logrando maximizar la recuperación de cobre.

Por último, se identificó las condiciones de dosificación que permitieron una máxima recuperación de cobre. También se estableció una metodología clara para la aplicación de estos reactivos colectores propuestos anteriormente, buscando la máxima eficiencia en la recuperación de cobre y considerando los impactos económicos y ambientales. Los resultados obtenidos proporcionarán información valiosa sobre las dosis efectivas de Z-6 y A-404 como colector primario y secundario, para el yacimiento “calvario”, respectivamente.

1.2 Formulación de problemas

1.2.1 Problema general

- ¿Cómo alcanzar una máxima recuperación de cobre mediante el proceso de flotación del mineral procedente del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye la dosificación del reactivo Z-6 como colector primario en la flotación para la recuperación de cobre en minerales sulfurados de cobre?
- ¿Cómo influye la dosificación del reactivo A-404 como colector secundario en la flotación para la recuperación de cobre en minerales sulfurados de cobre?
- ¿Afectará la granulometría del mineral para permitir una liberación adecuada del mineral para el proceso de flotación de mineral sulfurado de cobre?

1.3 Justificación

Se fundamenta en la necesidad de recuperar cobre a partir de un mineral sulfurado de Cu por el proceso de flotación por espumas. El mineral que se va a extraer del yacimiento “Calvario” tiene características únicas que requieren el uso de reactivos específicos para maximizar la recuperación del cobre.

Dado que el mercado de reactivos es amplio y variado, resulta crucial identificar aquellos productos que puedan ofrecer ventajas operativas y económicas significativas. La singularidad de este proyecto radica en su enfoque directo: en lugar de comparar múltiples reactivos, se propone profundizar en el análisis del Z-6 y A-404 para comprender en el contexto específico del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac.

La justificación se extiende a la relevancia económica y ambiental de la investigación. Al determinar la dosis ideal y las condiciones de operación para el Z-6 y A-404, se busca no

solo mejorar la recuperación y calidad del mineral, sino también optimizar el consumo de reactivos y minimizar los efectos ambientales asociados con el proceso de flotación.

1.4 Relevancia Social

Investigar metalúrgicamente el yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac, mejorará el comercio del mineral, por lo tanto, existirá mayor inversión, generando así puestos de trabajo, tecnología y beneficio económico.

1.5 Relevancia Tecnológica

Esta investigación desarrollara mayor tecnología dirigida a la recuperación de Cu a partir de mineral sulfurado, experimentar con reactivos primario y secundario mostrando la dosificación adecuada de cada etapa asegurara una mayor concentración y recuperación, incrementando el tonelaje y reduciendo costos de procesamiento.

1.6 Utilidad Metodológica

Destaca por su capacidad para ofrecer resultados reproducibles y datos precisos, fundamentales para la obtención de data del proceso y la recuperación del mineral.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

- Llegar a la máxima recuperación de cobre mediante el proceso de flotación del mineral sulfurado del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac.

1.7.2 Objetivos específicos

Con el fin de lograr el propósito principal, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Controlar la dosificación correcta del reactivo Z-6 para la flotación del mineral sulfurado de cobre.

- Controlar la dosificación adecuada del reactivo A-404 para la flotación del mineral sulfurado de cobre.
- Obtener el tamaño de partícula adecuado para el proceso de flotación del mineral sulfurado de cobre.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes nacionales e internacionales

2.1.1 Antecedentes internacionales

- En la tesis de Raquel Chica y Génesis Salinas, titulada “*Concentración de Sulfuros de Mineral de Cobre (Calcopirita), mediante el Proceso de Flotación con la variación de pH y tres tipos de Colectores*” (2017), presentada en la Universidad de Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería de Minas, se planteó como objetivo principal lograr la mayor recuperación de cobre utilizando los colectores Z-6 (Xantato Amfílico de Potasio), AR-1208 y AR-1242. Además, buscaba comparar los resultados de la flotación de cobre con estos tres colectores para identificar el mejor resultado, así como establecer la relación entre el tipo de colector y el pH que optimiza el proceso. Como resultados, se obtuvo que el colector Z-6 alcanzó la mayor recuperación, con 69.21%, seguido del colector AR-1208 con 66.67%, y finalmente el colector AR-1242 con 65.62%. En las conclusiones principales, se determinó que el colector Z-6 fue el más eficiente con pH de 10, mientras que su menor rendimiento se presentó un pH de 8. Además, se concluyó que la mayor recuperación de cobre está asociada a una granulometría cercana al 60% en malla -200.

2.1.2 Antecedentes nacionales

- Roberto Chávez Gamarra, en su tesis titulada “*Tratamiento metalúrgico mediante la flotación por espumas de los minerales de cobre del yacimiento San Rafael de Belén-Canas*” (2009), planteó como objetivos principales analizar la ley del yacimiento, estudiar las variables y parámetros del proceso de flotación, y evaluar la dosificación de reactivos necesarios para la recuperación y la calidad del concentrado de cobre. En las conclusiones, se destaca que, aunque el mineral contiene una mayor

proporción de cobre soluble en comparación con cobre sulfurado, la flotación es viable.

En el estudio se probaron reactivos como el colector Z-11, Aerofloat 25 diluido al 5 %, y el espumante Aerofroth 70. Los experimentos determinaron que un tiempo de flotación de 6 minutos es suficiente para obtener una mejor recuperación.

2.1.3 Antecedentes locales

- Welizvan Lupo Canahuire, en su tesis titulada “*Recuperación del cobre por flotación de los minerales sulfurados del yacimiento Sulfubamba - Apurímac*” (2014), presentada en la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, tuvo como objetivo principal recuperar el cobre a partir de los minerales sulfurados provenientes de los desmontes del yacimiento Sulfubamba mediante el proceso de flotación. Estos minerales presentan una ley de cobre inferior al 10%. En sus conclusiones, el autor señala que mediante el método de flotación por espumas se logró la recuperación del 87.93%, utilizando una pulpa con la densidad de 1350 g/L, un colector Z-11 en una dosificación de 0.929 g/TM, y aceite de pino como espumante en una proporción de 0.029 ml. Asimismo, se determinó que las variables más influyentes en el proceso de flotación son la densidad de la pulpa, la dosificación del colector Z-11 y el pH del sistema.

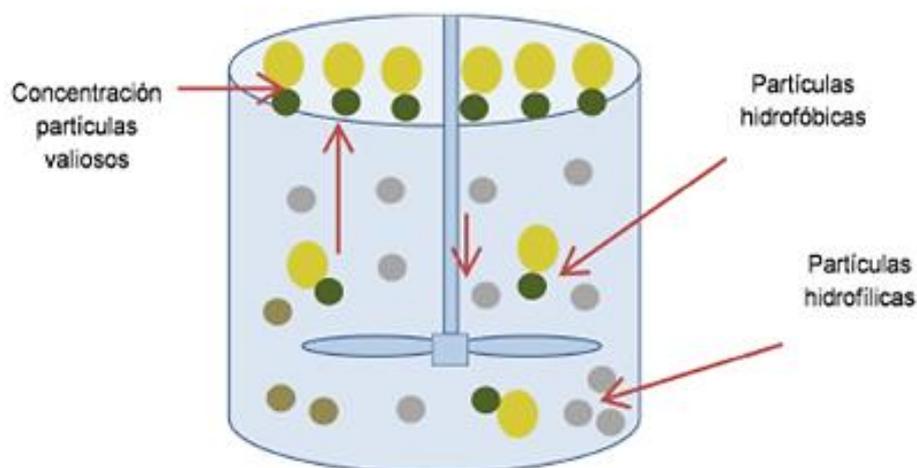
2.2 Definición de flotación por espuma

Según (Azañero Ortiz, 2015), “es un proceso fisicoquímico que ocurre dentro de un reactor cuyo objetivo es la separación del material valioso de la ganga por medio de burbujas aprovechando las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas del mineral” (pág. 6). Ver figura

2.1

Figura 2.1

Mecanismo de flotación



Nota. Fuente (Abarca Rodriguez, 2011).

2.3 Principio de flotación por espuma

Algunos autores como Azañero Ortiz, en el año 2015 indica que la técnica de flotación es un método clave en la minería, empleado para diferenciar y recolectar minerales útiles de entre el material no útil o ganga. Este proceso depende de la diferente capacidad de minerales para unirse a burbujas de aire (Azañero Ortiz, 2015), (pág. 38-39). Durante este método, se añade agua a las partículas minerales junto con reactivos especiales, como colectores, que facilitan que ciertas partículas se adhieran a las burbujas de aire.

2.3.1 Hidrofobicidad

La propiedad hidrofóbica se refiere a la tendencia de minerales de cobre a repeler el agua, favoreciendo así su adhesión a burbujas de aire en un medio acuoso (pág. 5). Este comportamiento se opone al de las moléculas hidrofílicas, que muestran una interacción positiva con el agua. En el proceso de flotación del cobre, se explota esta propiedad hidrofóbica de los minerales de interés mediante la adición de colector que incrementan su aversión al agua (Astucuri Tinoco, 1994).

2.3.2 Hidrofilicidad

En este proceso, se utiliza la hidrofilicidad para diferenciar y separar los sulfuros de cobre de otros materiales no deseados. Mientras que los minerales de cobre son tratados para ser hidrofóbicos y adherirse a las burbujas de aire, los materiales que no se desean en el producto final, como la ganga, exhiben o mantienen propiedades hidrofílicas (Abarca Rodríguez, 2011).

2.4 Factores del proceso de flotación por espumas

Los principales factores que influyen en la flotación del cobre y que impactan la eficiencia y efectividad del proceso de separación pueden clasificarse en tres categorías generales: químicos, físicos y operacionales.

2.4.1 Factores químicos

La elección adecuada y la proporción correcta de los reactivos empleados en la flotación, como colectores, espumantes y agentes modificadores, resultan fundamentales para inducir propiedades hidrofóbicas en los minerales de cobre y garantizar la estabilidad de la espuma producida durante el proceso (Astucuri Tinoco, 1994).

Ajuste del pH: El grado de acidez o basicidad en la mezcla puede tener un impacto profundo en cómo se comportan las superficies de los minerales y en su reacción ante los reactivos de flotación. Es vital regular el pH para la eficiencia máxima del proceso de flotación (Astucuri Tinoco, 1994).

Composición química de la mezcla: La presencia y cantidad de diferentes iones en la mezcla, incluidos los iones metálicos y las sales, juegan un papel importante en determinar la efectividad con la que los minerales de cobre pueden ser flotados (Bravo Galvez, 2004).

2.4.2 Factores físicos

La dimensión de las partículas de mineral de cobre incide en su superficie expuesta y en la posibilidad de interacción con las burbujas de aire. Las partículas más pequeñas pueden perderse en los relaves, mientras que las demasiado grandes podrían no fijarse bien a las burbujas (Abarca Rodriguez, 2011).

2.4.3 Factores operacionales

Composición de la alimentación: La composición mineral y la presencia de impurezas en el mineral pueden influir en el proceso de flotación (Astucuri Tinoco, 1994).

Configuración del circuito de molienda: La manera en que el mineral es molido y clasificado antes de la flotación puede impactar la distribución del tamaño de partícula y, consecuentemente, el rendimiento de la flotación.

Diseño de la celda y agitación: El diseño de la celda de flotación y el mecanismo de agitación pueden afectar la suspensión de partículas, la dispersión de aire y la eficiencia de mezcla, influenciando el contacto entre partículas y burbujas (Abarca Rodriguez, 2011).

2.5 Flotación de sulfuros de cobre

El cobre se extrae principalmente de sulfuros como la calcopirita y la bornita, con una contribución menor de minerales oxidados. Los sulfuros de cobre muestran una buena flotabilidad que solo disminuye con la oxidación o interferencias como la depresión por lamas. (Sutulov, 1963).

Los reactivos químicos hacen que los minerales de cobre repelan el agua y se adhieran a las burbujas de aire para separarlos de la ganga. La polaridad afecta cómo estos minerales interactúan con los reactivos, ya que las diferencias en la carga superficial pueden alterar su reacción a estos compuestos. La clave está en manipular la química de la superficie mineral

para optimizar la separación del cobre, lo cual es fundamental para la recuperación efectiva del mineral (Azañero Ortiz, 2015).

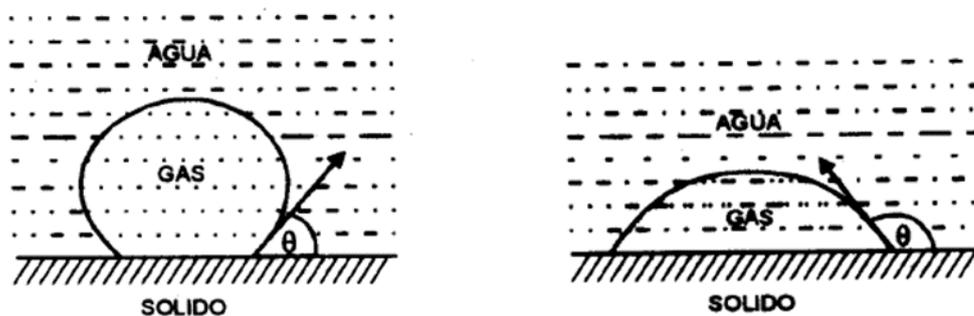
2.6 Contacto partícula/burbuja

Según (Domic Mihovilovic, Sánchez, & Correa C., 2006) encuentro entre partículas y burbujas es esencial en la flotación, como es el caso de los sulfuros de cobre. Dicho contacto constituye el momento decisivo que define si una partícula mineral logrará adherirse a una burbuja de aire para ser posteriormente segregada del material circundante (pág. 139-141).

El proceso de flotación depende de la capacidad de las partículas hidrofóbicas para adherirse a burbujas de aire, lo cual ocurre si las fuerzas de atracción superan las repulsivas y la tensión superficial del agua. Ver figura 2.2

Figura 2.2

Esquema contacto partícula/ burbuja



Nota. Fuente (Sutulov, 1963).

La efectividad de la flotación, un proceso clave en la minería para separar partículas valiosas. El tamaño y la consistencia de las burbujas son fundamentales; burbujas más pequeñas mejoran la adhesión con partículas finas, lo que se optimiza utilizando espumantes y agentes químicos para controlar su estabilidad y tamaño (Sutulov, 1963).

2.6.1 Características de las distintas interfaces

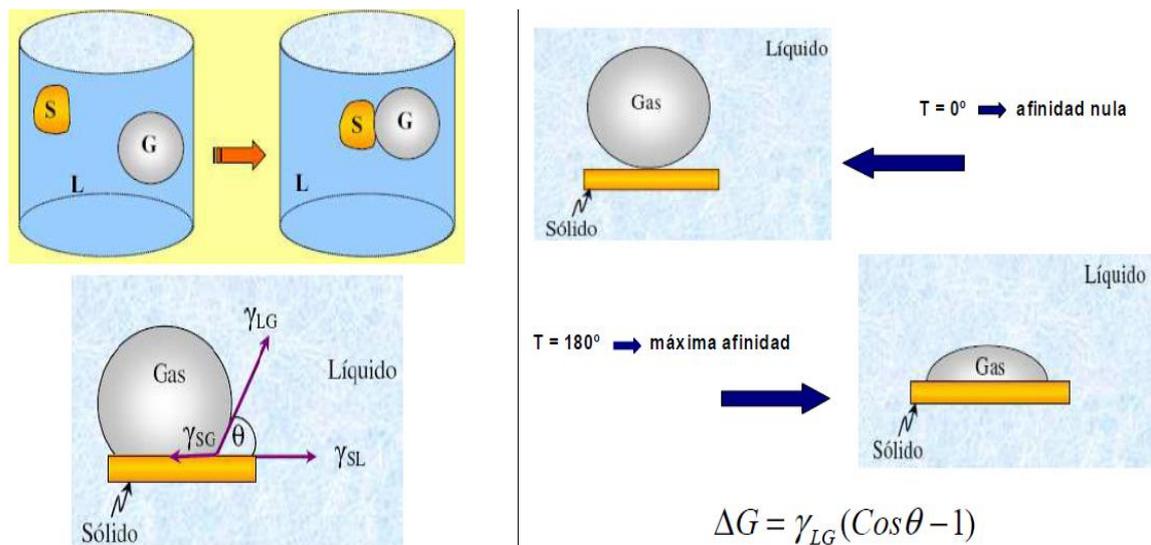
Aire-Líquido

Según (Gaudin, 1922), una propiedad clave de la interfase gas-líquido es el drástico cambio de densidad que ocurre entre ambas fases, donde la densidad de la materia se reduce aproximadamente mil veces al pasar del estado líquido al gaseoso. Ver figura 2.3

Solido-Líquido-Aire

Figura 2.3

Esquema de elementos de flotación



Nota. Fuente (Abarca Rodriguez, 2011).

2.6.1.1 Efectos de la doble capa eléctrica en el la flotación

La doble capa eléctrica es crucial en la flotación, afectando directamente cómo los reactivos químicos, como colectores y espumantes, se adhieren a los minerales. Esta adherencia determina la capacidad del mineral para unirse a las burbujas y ascender a la superficie para su recolección (Abarca Rodriguez, 2011). Una correcta adhesión evita que el mineral se quede sumergido y garantiza una flotación exitosa. Por otro lado, la carga eléctrica de la doble capa asegura que las partículas minerales se mantengan dispersas, impidiendo la formación de agregados que podrían interferir con el proceso, y permite que las burbujas se adhieran a cada partícula individualmente, facilitando una separación efectiva.

2.6.1.2 Iones determinantes de potencial

Encargados de fijar la carga eléctrica en la superficie de un mineral, y juegan un papel esencial en cómo el mineral interactúa con su entorno, especialmente en procesos industriales como la flotación. En los minerales sulfurados la presencia de iones sulfuro (S^{2-}) suele dar lugar a una carga superficial negativa. Esta carga es fundamental porque influye en cómo el mineral se comportará en la flotación, ya que una carga superficial negativa puede afectar la manera en que los reactivos de flotación se adhieren al mineral (Azañero Ortiz, 2015).

La carga neta de la superficie mineral puede variar con la adición de diferentes reactivos y también puede ser alterada por el pH del entorno. Por ejemplo, en condiciones de pH bajo, la superficie del mineral puede adquirir más iones H^+ , resultando en una carga superficial más positiva, mientras que, en un pH alto, es más probable que se adsorban iones OH^- , lo que puede mantener o incrementar la negatividad de la carga superficial (Crozier, 1992). Los reactivos de flotación como los xantatos, utilizados para incrementar la hidrofobicidad de los minerales sulfurados, se adhieren a la superficie del mineral y cambian su carga al interactuar con los iones metálicos presentes, como los iones de cobre en los sulfuros de cobre. Esta interacción resulta en la formación de complejos superficiales que alteran la carga superficial y facilitan la unión del mineral a las burbujas, permitiendo así que el mineral ascienda a la superficie en la celda de flotación y sea recolectado (Greet, 2010).

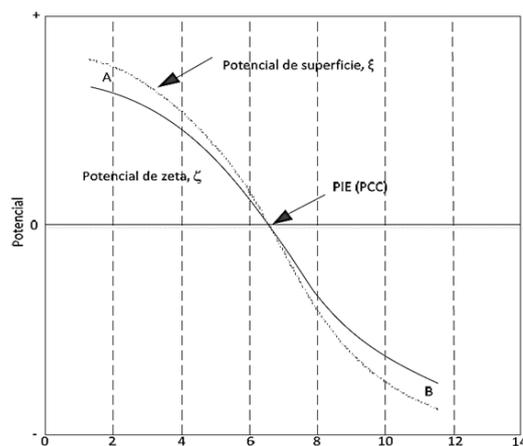
2.6.2 Punto de carga cero

En la práctica, el PCC es útil porque nos indica las condiciones bajo las cuales el mineral no se inclinará a atraer iones adicionales basados en la carga eléctrica. Si el ambiente es más ácido (pH bajo) que el PCC, la superficie del mineral se carga positivamente, atrayendo iones negativos. Por otro lado, si el ambiente es básico (pH alto) respecto al PCC, la superficie se carga negativamente, atrayendo iones positivos. Este conocimiento es fundamental en la flotación: al ajustar el pH alrededor del PCC, se puede controlar la

interacción entre el mineral y los reactivos de flotación, optimizando la adhesión del mineral a las burbujas y mejorando la eficiencia de su recuperación. La posición del PCC varía según el tipo de mineral y es una herramienta valiosa para afinar los procesos de separación en la industria minera (Feijoo, 2023). Ver figura 2.4

Figura 2.4

Punto de carga cero



Nota. Fuente (Abarca Rodriguez, 2011).

2.6.3 Angulo de contacto

2.6.3.1 Angulo de contacto

Es esencial en la flotación, reflejando la naturaleza de la interacción entre un líquido y un sólido; específicamente, cómo el agua se comporta en presencia de un mineral y el aire. El ángulo de contacto se observa en el punto de unión de las tres fases: agua, aire y mineral. Nos proporciona información valiosa sobre la afinidad del mineral con el agua: un ángulo de contacto bajo sugiere que el mineral es hidrofílico, es decir, el agua se dispersa o moja la superficie del mineral fácilmente. Por el contrario, un ángulo de contacto grande, acercándose a 180 grados, indica que el mineral es hidrofóbico, lo que significa que el agua forma gotas y no se dispersa sobre el mineral (Sutulov, 1963).

2.7 Importancia de los reactivos dentro del sistema de flotación

Según (Astucuri Tinoco, 1994) la elección adecuada de los reactivos de flotación es esencial en la minería para separar los minerales valiosos de aquellos que no lo son. Estos reactivos son compuestos químicos que cambian cómo actúan las partículas minerales en el agua, haciendo que se adhieran a las burbujas y suban a la superficie.

2.7.1 Clasificación de reactivos de flotación

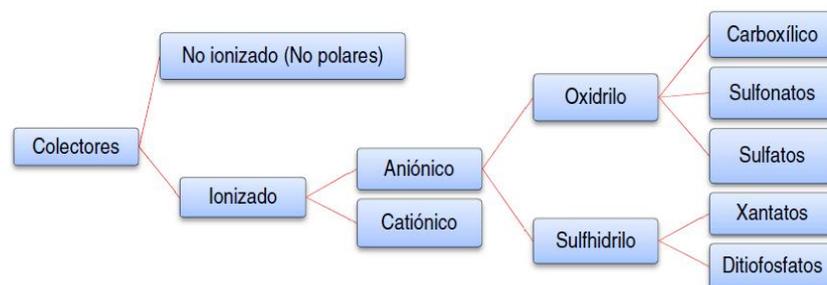
2.7.1.1 Colectores

Son sustancias orgánicas que cambian la forma en que se comporta la superficie de los minerales. Compuestos como los xantatos, ácidos grasos y sus sales, ciertos aceites, tienen una estructura dual: una parte polar que se adhiere al mineral y una parte no polar que rechaza el agua. La eficacia de un colector se mide por su habilidad para formar doble capa (Crozier, 1992).

En la figura 2.5 se observa una clasificación general de los colectores donde se puede observar que los colectores se subdividen en aniónicos y catiónicos.

Figura 2.5

Clasificación de los colectores



Nota. Fuente (Azañero Ortiz, 2015).

Por la figura 2.5 Se clasifican según el tipo de carga que adquieren al disolverse en agua. Los colectores aniónicos son los más utilizados; estos forman aniones (partículas cargadas negativamente) cuando se disuelven en el agua y son especialmente eficaces para

adherirse a los minerales que tienen una superficie cargada positivamente (Abarca Rodriguez, 2011).

2.7.1.1.1 Xantato amílico de potasio

El xantato amílico de potasio (Z-6), es reconocido por su efectividad como colector en la flotación. Muy eficiente en flotación de sulfuros parcialmente oxidados (chemicals, 2009). Vienen en presentación solida parecidos a briquetas pequeñas ver la figura 2.6.

Su aplicación puede ser en solitario o en combinación con otros reactivos de flotación, y su dosis varía ampliamente, de 20 a 160 gramos por tonelada de mineral tratado, dependiendo de las particularidades y requerimientos específicos del proceso. Químicamente, el xantato amílico de potasio es un derivado del ácido carbónico, donde uno o más átomos de oxígeno han sido reemplazados por azufre, otorgándole una estructura heteropolar. Esta estructura le confiere la capacidad de interactuar con las superficies minerales, modificándolas de hidrofílicas a hidrofóbicas, (Bravo Galvez, 2004).

Figura 2.6

Xantato como colector primario para sulfuros de cobre



Nota. Fuente fotografías tomadas por el propio autor.

La eficiencia de los xantatos como agentes colectores en la flotación se ve afectada por la configuración de su cadena átomos de carbono: las cadenas más largas aumentan la

potencia colectora, permitiendo una mayor recuperación de minerales a partir de la misma concentración de colector comparado con xantatos de cadena más corta (Cytec, 2002). Esto se debe a que las cadenas largas intensifican la hidrofobicidad de la superficie mineral, mejorando la flotación.

Tabla 2.1

Relación de recuperación de mineral de Cu y concentración de xantato

TIPO DE XANTATO	RECUPERACION %			
	5 gr/ton	10 gr/ton	20 gr/ton	40 gr/ton
Xantato Etilico	69.8	82.6	90.9	93.6
Xantato Isopropilico	76.4	89.8	94.9	96.1
Xantato Butilico Secundario	82.4	91.3	95.3	96.8
Xantato Amilico	86.9	93.5	95.0	96.0

Nota. Fuente (Azañero Ortiz, 2015).

2.7.1.1.2 Ditiófosfato

Son compuestos que actúan como colectores en procesos de flotación de minerales sulfurados. Su fórmula química general es $(RO)_2P(S)SK$, donde R es un grupo alquilo y K un catión metálico, generalmente potasio o sodio. Su eficacia radica en la presencia de grupos de azufre, que tienen una alta afinidad por minerales metálicos sulfurados, permitiendo una adsorción química selectiva sobre su superficie (Astucuri Tinoco, 1994).

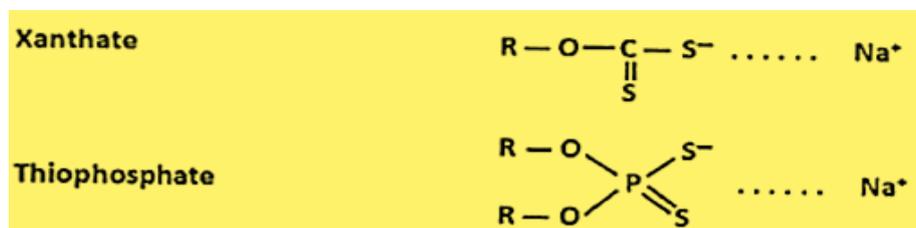
2.7.1.1.3 Ditiófosfato A-404

El A-404 Es un ditiófosfato de potasio optimizado para flotación de minerales sulfurados metálicos. Su composición química proporciona una adsorción eficiente sobre superficies sulfuradas, formando enlaces químicos estables que incrementan la hidrofobicidad del mineral. Generalmente se comporta como Colector secundario – Aeropromotor 404, su compatibilidad con el Z-6 y el D-250 permite optimizar tanto la flotabilidad como la selectividad, asegurando un proceso eficiente (Abarca Rodriguez, 2011).

La figura 2.7 compara las estructuras químicas de un xantato y un ditiofosfato. Aunque ambos colectores contienen azufre, que es esencial para su actividad en la flotación, difieren en su composición: el xantato tiene un grupo funcional carbono-azufre, mientras que el ditiofosfato tiene un grupo funcional fósforo-azufre (Sutulov, 1963). Los ditiofosfatos son conocidos por su mayor solubilidad en agua y su sensibilidad a los depresores.

Figura 2.7

Comparación entre xantato y ditiofosfato



Nota. Fuente (Sutulov, 1963).

2.7.1.2 Espumantes

Al actuar como agentes de activación superficial que mejoran la formación y estabilidad de la espuma. La estructura química heteropolar de los espumantes les permite tener una parte polar, que es hidrofílica y atrae agua, y una parte apolar, que es hidrofóbica y repela el agua. Esta dualidad es lo que permite que la espuma se mantenga y sea capaz de retener los minerales objetivo dentro de sus burbujas (Feijoo, 2023).

El espumante debe ser capaz de debilitar la tensión superficial del medio para formar burbujas, pero sin comportarse como un colector, lo cual podría afectar la selectividad del proceso hacia los minerales deseados. La eficacia de un espumante depende de su balance entre la parte apolar, que define la robustez de la espuma, y la parte polar, que determina su afinidad por el agua y la habilidad para estabilizar la espuma (García Zuñiga, 1935).

2.7.1.2.1 Dowfroth 250

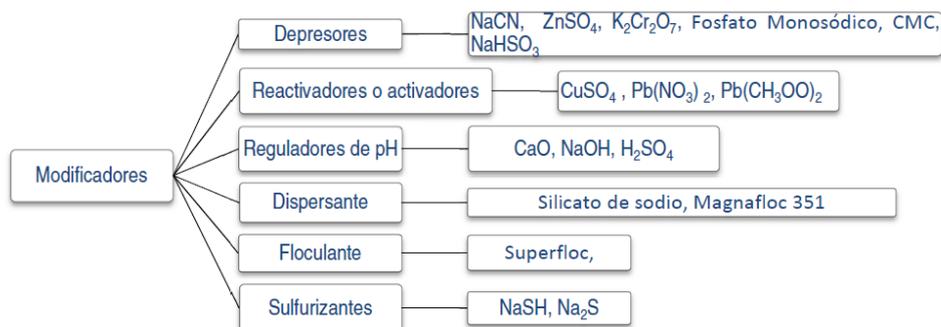
Los Dowfroths son espumantes sintéticos, específicamente ésteres metílicos de glicol de polipropileno, que se caracterizan por ser líquidos de baja viscosidad y solubles en agua. Así mismo la identificación con los números indica el peso molecular del polímero donde a mayor peso molecular indica mayor capacidad de generar espuma (Sutulov, 1963).

El Dowfroth 250, en particular, destaca por su peso molecular específico de 250 y su densidad de 0.967 a 25°C. Se utiliza en aplicaciones donde la selectividad es primordial y puede ser añadido al proceso de flotación puro o diluido en solución (Abarca Rodriguez, 2011). Dentro de su composición podemos encontrar ésteres metílicos del propilén glicol que son solubles en agua y se caracterizan por su falta de propiedades colectoras (Astucuri Tinoco, 1994).

2.7.1.3 Modificadores

Estas sustancias pueden modificar el ambiente químico de la pulpa, influenciando cómo las partículas interactúan entre sí y con los reactivos. Estos pueden ser compuestos orgánicos o inorgánicos que incluyen ácidos y bases para ajustar el pH del sistema (Bravo Galvez, 2004). Un modificador muy empleado es la cal, que actúa como un depresor para ciertos minerales de sulfuro como la pirita, contaminantes en los concentrados de sulfuros de Cu.

El rol de los modificadores como la cal es especialmente importante en la supresión de minerales no deseados. Ion de calcio (Ca^{2+}) y los iones hidroxilo (OH^-) que se forman cuando la cal se disuelve en agua, pueden alterar significativamente la superficie de los sulfuros de hierro, disminuyendo su flotabilidad incluso en presencia de altas concentraciones de colectores. (Sutulov, 1963). En la figura 2.8 se puede observar mediante un esquema la clasificación general de los modificadores.

Figura 2.8*Clasificación de los modificadores*

Nota. Fuente (Bravo Galvez, 2004).

2.7.1.3.1 La Cal

El óxido de calcio en forma de polvo, como función principal permite regular el pH de la pulpa. También deprime el hierro, muy importante para la presencia de pirita.

En la tabla 2.2 el autor (Astucuri Tinoco, 1994) nos presenta un resumen del efecto que causa los reactivos cuando se agrega mucha o poca cantidad de los mencionados. Muy importante para conocer el impacto que generan los reactivos en el proceso de flotación.

Tabla 2.2*Resumen exceso - defectos sobre espumantes, colectores, modificadores*

Reactivos	Exceso	Defecto
ESPUMANTES Aceite de Pino Frother 70 Dowfroth 250	Gran cantidad de espumas Rebalsan los canales y cajones Tendencia a ensuciar los concentrados	Muy baja la columna de espuma Los sulfuros valiosos se pasan al relave
COLECTORES Xantato Z – 11 Xantato Z – 6 Aerofloat 25 Ditioposfos Reactivo 301	Flotan todo tipo de sulfuros No hay selección Se ensucian los concentrados Flota pirita e insolubles Produce carga circulante	Espumas muy pobres con concentrado limpio Espumas muy frágiles Los sulfuros valiosos se pasan al relave
MODIFICADORES Sulfato de Zinc y Bisulfito de sodio (Deprime sulfuros de zinc, ZnS)	Despilfaro, consumos muy altos Aumenta consumo de CuSO ₄ , Peligro de envenenar la pulpa Depresión de sulfuros de plomo Activación de sulfuros de hierro al bajar el pH	Flotan los sulfuros de zinc en el circuito de plomo o bulk
Cianuro de Sodio (Deprime Pirita y sulfuro de zinc)	Un exceso en el circuito de Pb o bulk, deprime los sulfuros de Pb y Ag Activa los sulfuros de Zn al subir pH	Flotarían mucho hierro y se ensuciaría el concentrado
Sulfato de cobre (Reactiva los sulfuros de zinc que han sido deprimidos por el sulfato de zinc)	Se espesan las espumas de los concentrados de zinc, y los concentrados se ensucian con pirita Producen pérdida de sulfuros en el relave Producen carga circulante innecesaria	No se reactivan completamente los sulfuros de zinc que vienen de la flotación bulk. Además, se suavizan las espumas y los sulfuros valiosos se pasan al relave (espumas muy frágiles)
Lechada de cal , Carbonato de sodio (reguladores de pH y depresores de Pirita)	Se eleva demasiado el pH Las espumas son frágiles Aumenta el consumo de colectores Los sulfuros se pierden en el relave	Se baja el pH Flota pirita en exceso Se espesa las espumas Se ensucia el concentrado
Superfloc , Separan (floculante, aglomerantes de lamas)	Demasiado costo. Veloz asentamiento de los sólidos, pueden plantar los rastrillos del espesador	Pérdida de sólidos en el rebalse del espesador

Nota. Fuente (Astucuri Tinoco, 1994).

2.8 Cinética de flotación

El modelo cinético de García-Zúñiga es una herramienta fundamental para entender y mejorar el rendimiento de la flotación de minerales en función del tiempo.

Con parámetros como la recuperación máxima (R_{∞}), la velocidad del proceso (k), este modelo permite ajustar y prever la recuperación de minerales. Su implementación es crucial para diseñar y optimizar operaciones de flotación, mejorando tanto la eficiencia como la recuperación de recursos valiosos (García Zúñiga, 1935).

la ecuación que se presenta a continuación nos permite predecir la recuperación total de un mineral conociendo la constante “ k ” y variando los tiempos de flotación. Es un modelo cinético para ajuste de datos experimentales y cálculo de parámetros cinéticos en la flotación.

$$R_t = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

R(t): Representa la recuperación acumulada de mineral flotado en un tiempo específico (t).

Este valor indica la cantidad total de mineral recuperado hasta un momento determinado del proceso (Astucuri Tinoco, 1994).

R_{∞} : Es la recuperación máxima teórica que el sistema podría alcanzar si la flotación se prolongara indefinidamente. Este parámetro depende de las propiedades del mineral, la calidad de los reactivos utilizados y las condiciones operativas del proceso (Astucuri Tinoco, 1994).

k: La constante cinética de flotación, que define la velocidad a la que el mineral es recuperado durante la flotación. Un k mayor indica un proceso más rápido y eficiente.

t: Corresponde al tiempo de flotación.

2.9 Celdas de flotación

Para llevar a cabo la flotación, se utilizan celdas de flotación, que son equipos esenciales que permiten que el mineral "flote" efectivamente. Estas celdas, que pueden ser rectangulares o cilíndricas, están equipadas con diversos componentes como mecanismos de agitación y sistemas de aireación, diseñados para crear condiciones hidrodinámicas óptimas y maximizar la recuperación del mineral valioso (Azañero Ortiz, 2015).

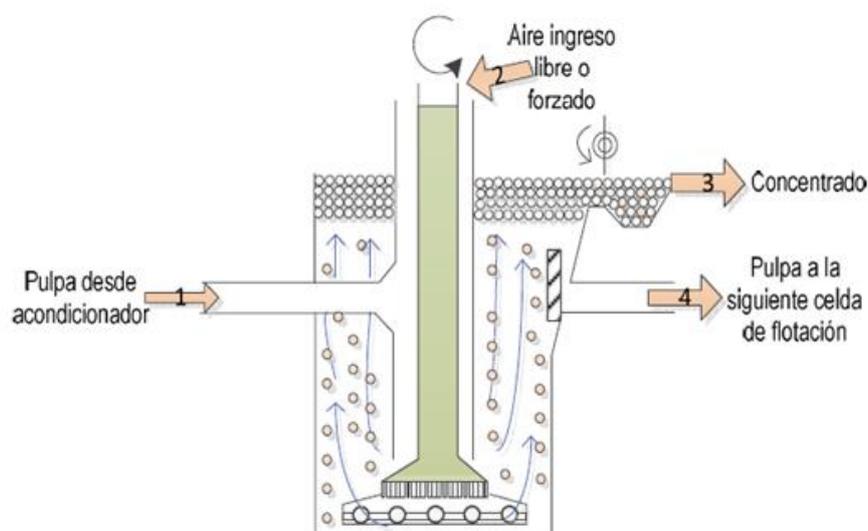
2.9.1 Función de las celdas de flotación

Su tarea principal es mantener las partículas minerales en suspensión constante, evitando que se asienten en el fondo, lo que es vital para una flotación efectiva. Además, estas celdas están diseñadas para asegurar una aireación adecuada, dispersando burbujas de aire de manera uniforme a través del volumen de la celda, lo cual es esencial para la formación de la espuma que capturará las partículas valiosas (Azañero Ortiz, 2015).

Observando la figura 2.9 podemos entender de mejor manera el funcionamiento de una celda de flotación.

Figura 2.9

Funcionamiento de las celdas de flotación



Nota. (Sutulov, 1963).

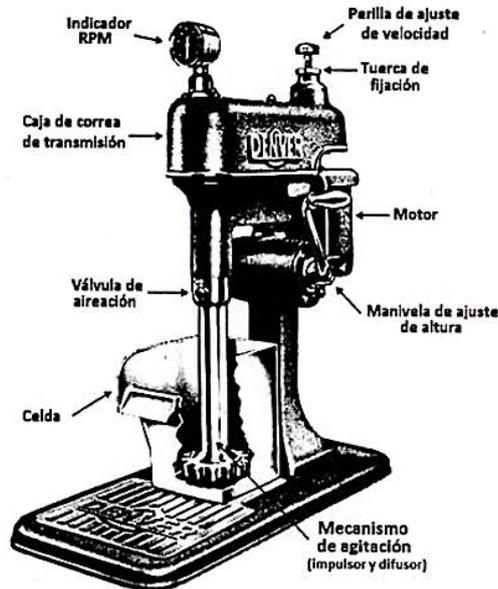
2.9.2 Celda de laboratorio

Una celda de flotación de minerales es un equipo que tiene la función de separar los minerales valiosos de la ganga mediante selección por burbujas, por ejemplo, la celda Denver D-12 es fundamental para la investigación y desarrollo de procesos de flotación, permitiendo simular y estudiar el comportamiento de los minerales bajo diferentes condiciones antes de aplicar estos hallazgos en las plantas de procesamiento industrial (Azañero Ortiz, 2015).

La máquina de flotación Denver D-12 se ilustra con sus componentes claves, como el motor que impulsa el mecanismo de agitación necesario para mantener las partículas en suspensión y promover el contacto entre burbuja y partícula de mineral. En la figura 2.10 observaremos una celda de flotación Denver con sus partes.

Figura 2.10

Esquema de una celda de flotación nivel laboratorio



Máquina de Flotación de Laboratorio Denver D-12

Nota. Fuente (Astucuri Tinoco, 1994).

CAPITULO III

HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

- Mediante el proceso de flotación se obtiene una máxima recuperación de cobre del mineral sulfurado del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac

3.1.2 Hipótesis específica.

- El control de la dosificación del reactivo Z-6 permite una máxima recuperación de cobre en el proceso de flotación del mineral sulfurado de cobre.
- El control de la dosificación del reactivo A-404 permite una máxima recuperación de cobre en el proceso de flotación del mineral sulfurado de cobre.
- Obtener la granulometría adecuada del mineral permite una óptima liberación del mineral valioso mejorando la recuperación de cobre en la flotación.

3.2 Variables

3.2.1 Variables dependientes

- Recuperación de cobre

3.2.2 Variables independientes

- Dosificación de Z-6
- Dosificación de A-404
- Granulometría

CAPITULO IV

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

4.1 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental, ya que implica la realización de pruebas para obtener resultados. Según (Sampieri, 2014), los experimentos puros cumplen con dos requisitos fundamentales: el control de las variables y la validez interna del proceso experimental.

4.2 Método de investigación

Se aplicó el método de investigación deductivo, debido a que se aplicó teorías generales de flotación de minerales y la acción de reactivos (Z-6 y A-404) para determinar un hecho concreto (Tafur Portilla, 2012).

4.3 Tipo de investigación

La investigación fue tecnológica con un enfoque de tipo cuantitativo y de carácter experimental (Tafur Portilla, 2012).

4.4 Alcance de la investigación

Esta investigación tuvo un enfoque descriptivo y correlacional, ya que se definieron los conceptos y variables involucrados, además de examinar cómo las variables independientes influyen en la variable dependiente para comprender los efectos generados (Montgomery, 2004).

4.5 Ubicación del yacimiento

El yacimiento Calvario se ubica entre Cotabambas y Antabamba a 6 horas de la ciudad del Cusco, por la ruta Cusco – Cotabambas. En la figura 4.1 podremos observar una vista panorámica de la ubicación del yacimiento Calvario.

Figura 4.1

Vista panorámica del yacimiento Calvario



Nota. Adaptado de Google Maps, (2024)

4.6 Población

Nuestra población es el mineral del yacimiento Calvario ubicado al suroeste de Cotabambas, Apurímac, perteneciente a la ***ASOCIACIÓN DE MINEROS ARTESANALES “CALVARIO” CON RUC: 20490983831.***

4.7 Muestra

Se recolecto una muestra de 60 kg del yacimiento Calvario que fue preparada mediante procesos mecánicos. Teniendo la muestra homogenizada, se dividió en dos partes: los primeros 30 kg para análisis químico y los 30 kg restantes se emplearon en las pruebas de flotación.

4.8 Técnicas de selección de muestra

La selección de la muestra en el yacimiento Calvario se realizó en dos etapas: observación y recolección. Se procedió a recolectar muestras utilizando una pala, eligiendo fragmentos de mineral de tamaño similar (entre 3 y 4 pulgadas) de diferentes puntos, manteniendo una distancia de 1.5 metros hacia los lados, al frente y hacia atrás entre cada punto.

4.9 Métodos y herramientas para la recopilación de datos

Observación: Mediante la observación se determinó diferentes puntos desde la operación de muestreo al observar las características físicas de un mineral sulfurado de cobre, otro ejemplo, como el plateo al momento de la flotación y para determinar si hay presencia de otros elementos indeseados. (Tafur Portilla, 2012)

Análisis químico: Es un método para identificar y cuantificar una materia en específico, en este caso se optó por el uso de laboratorio químico por volumetría o adsorción atómica, con el fin de conocer las leyes de nuestro mineral de cabeza y aprovechar para descartar el contenido de cobre soluble en dicha muestra. Las leyes reportadas se observan en el anexo “C”.

Ensayo de flotación en el laboratorio: Método que implica mezclar el mineral con reactivos y agua en una celda de flotación para separar las partículas valiosas mediante burbujas de aire, se utilizó celdas de flotación de laboratorio para realizar ensayos que imiten el proceso de concentración del mineral y evaluar la eficacia en la recuperación de cobre utilizando el Z-6 y A-404 en distintas condiciones.

Software de análisis de datos: Herramienta que convierte la información en gráficas y tablas fáciles de entender, se utilizó el software Minitab, reconocido por su capacidad para realizar análisis como ANOVA, diseño de experimentos factoriales y gráficos de Pareto. Este software permitió evaluar el impacto de variables en la recuperación de cobre. Su uso facilitó la interpretación visual y estadística para optimizar el proceso de flotación.

4.10 Validez y confiabilidad de instrumentos

Es esencial contar con instrumentos de medición fiables y válidos. Esto implica una serie de estrategias específicas: la calibración regular de los equipos según normativas internacionales, el uso de materiales para validar análisis químicos, la repetición de ensayos para comprobar la precisión de resultados (Sampieri, 2014).

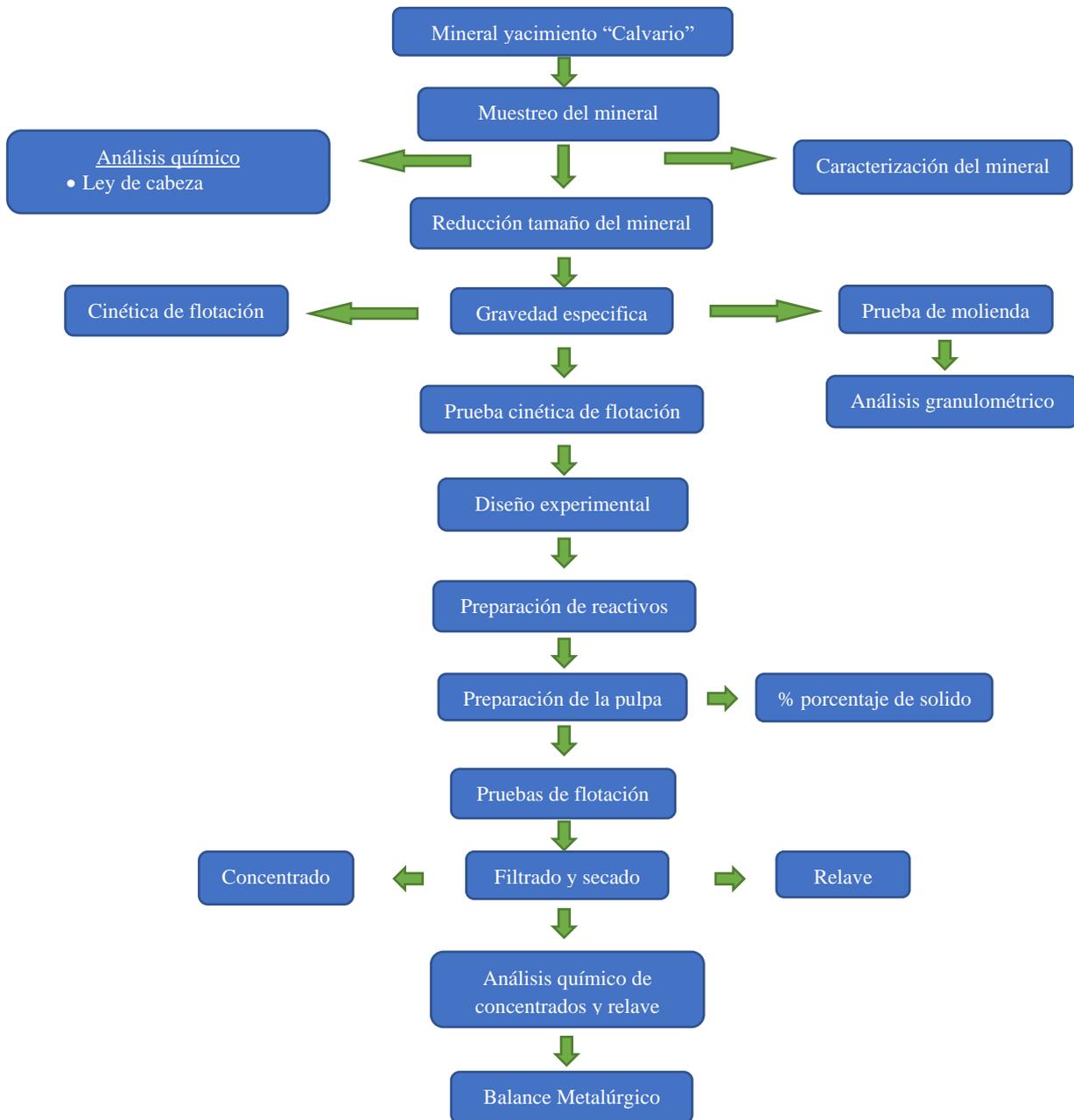
4.11 Técnica de procedimientos de análisis de datos

Se utilizo el software Minitab para el análisis de datos ya que el software cuenta con un entorno fácil de visualizar, permitirá analizar de mejor manera los datos mediante un análisis inferencial que ayudará a validar la hipótesis previamente propuesta. A continuación, se presenta la secuencia general para la experimentación. Ver figura 4.2

Una vez registrado la correlación entre las variables, se procederá a utilizar un modelo matemático adecuado para ajustar de mejor manera los datos.

4.12 Diagrama de bloque de las pruebas experimentales

En la figura 4.2 podemos observar el diagrama de bloques y apreciar cómo se desarrolló la parte experimental desde la toma de muestra hasta el resultado final.

Figura 4.2*Diagrama de Bloques*

Nota. Elaborado por los tesisistas.

CAPITULO V

DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 Método de muestreo del yacimiento

Se obtuvo la muestra significativa del mineral de la zona de sulfuros del yacimiento Calvario para dar inicio a las pruebas experimentales. La muestra seleccionada proviene el material residual generado por los mineros artesanales. El muestreo utilizado fue el muestreo por puntos (Grab Sampling), lo cual permite obtener una muestra puntual de áreas específicas del material descartado.

5.1.1.1 Herramientas y materiales.

Tabla 5.1

Materiales y herramientas para el muestreo

Categoría	Herramientas / Material	Cantidad
Herramientas	Comba truper	02
	Pala truper	02
	Estacas de madera (55cm)	08
	Cordel nylon azul	100 m
	Pico grande truper	02
	Cinta métrica (50 m) truper	02
Materiales	Bolsa de lona	06
	Marcadores	02

Nota. Fuente propia.

5.1.1.2 Procedimiento de muestreo

I. Preparación del Área Seleccionada

- ✓ Marcar la zona de interés, asegurándose de que esté despejada y adecuada para iniciar el trazado de la malla.

II. Configuración de la Malla

- ✓ Dividir el área en una malla de celdas de 100 x 100 cm, asegurando que cada celda esté identificada y bien delimitada.

III. Recolección de Material en los Puntos de la Malla

- ✓ Extraer el material en el centro de cada celda utilizando las herramientas necesarias para asegurar consistencia en la recolección y evitar mezclas entre celdas.

IV. Formación de la Muestra Total

- ✓ Una vez recolectado el material de todos los puntos de la malla, combinar las muestras para obtener un peso total de 60 kg, asegurando que la cantidad sea precisa para mantener la representatividad de la muestra.

5.1.2 Análisis granulométrico

Después de reducir de tamaño la muestra y pasarla al 100% por malla -10, se prepararon tres submuestras adicionales de 100 gramos cada una, las cuales fueron molidas durante 8, 10 y 12 minutos, respectivamente. Como resultado, se obtuvo un material con mayor grado de fineza, seguido de un análisis granulométrico en cada submuestra para identificar la distribución de tamaños de las partículas.

5.1.2.1 Herramientas, equipos y materiales

Tabla 5.2

Herramientas, equipos y materiales para el análisis granulométrico

Categoría	Elemento	Especificación
Equipos	Tamizadora vibratoria	-
	Lupa binocular	-
Herramientas	Conjunto de tamices estándar ASTM	Mallas: 10, 30, 40, 50, 100, 140, 200, 270, 400
	Recipiente de porcelana	-
Materiales	Mineral pulverizado	100 g (100% -10M)
	Frasco lavador	-
	Cuaderno de registro	-

Nota. Fuente Propia.

5.1.2.2 Procedimiento para el análisis granulométrico

I. Pesaje del Mineral

- ✓ Pesar cuidadosamente 100 g de mineral para la prueba.

II. Preparación de los Tamices

- ✓ Organizar el juego de tamices en orden, desde la malla más gruesa hasta la más fina, asegurándose de que estén bien colocados en el equipo Ro-tap.

III. Tamizado del Mineral

- ✓ Verter los 100 g de mineral al conjunto de tamices. Activar el equipo Ro-tap y tamizar durante 11 minutos para asegurar una separación adecuada de las partículas según su tamaño.

IV. Pesaje y Registro de Resultados

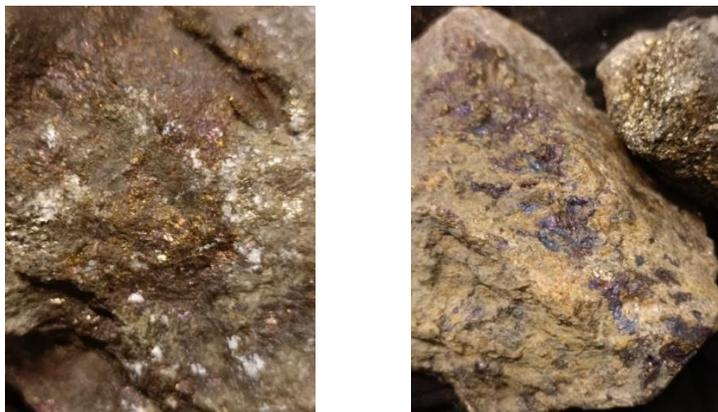
- ✓ Al finalizar el tamizado, pesar el material retenido en cada tamiz y registrar los pesos obtenidos para cada fracción de tamaño.

5.2 Caracterización del material de estudio

Mineral proveniente de 5 socavones ubicado en Cotabambas Apurímac centro poblado calvario. ver Anexo C.

Figura 5.1

Mineralización del yacimiento Calvario



Nota. Presenta inclusiones de bornita y calcopirita, identificables por sus tonalidades iridiscentes púrpuras, azules y amarillas metálicas, JEAL ENTERPRISE SAC, 2024.

5.2.1 Ley de cabeza del mineral

Son reportados en el anexo C.1.

5.2.2 Prueba de molienda análisis granulométrico

El objetivo es establecer el tiempo de molienda ideal para el mineral extraído del yacimiento Calvario, un requisito esencial para las pruebas de flotación. Realizar estas pruebas de molienda es indispensable para construir un modelo matemático que facilite la determinación del tiempo de molienda más adecuado.

5.2.2.1 Equipos herramientas y materiales

Tabla 5.3

Equipos y materiales para la molienda y análisis granulométrico

Categoría	Elemento	Especificación
Equipos	Molino de bolas	9.4" x 7.4" (Motor 1749 RPM, 59 Hz, 220V, 15.6 A)
	Balanza electrónica Sartorius	-
Herramientas	Conjunto de tamices estándar	Mallas: 10, 30, 40, 50, 100, 140, 200,
	ASTM	270, 400
	Brochas	3"
Materiales	Mineral pulverizado	540 g (100% -10M)
	Frasco lavador	-
	Cuaderno de registro	-

Nota. Fuente propia.

5.2.2.2 Procedimiento para la prueba de molienda

I. Pesaje del Mineral para Pruebas

- ✓ Pesar 540 g de mineral para cada una de las tres pruebas, obteniendo así la cantidad necesaria para realizar las moliendas en diferentes tiempos.

II. Realización de la Molienda

Realizar la molienda del mineral en intervalos de 8, 10 y 12 minutos, Para analizar cómo el tiempo de molienda influye en el tamaño de las partículas.

III. Preparación de la Muestra para Análisis Granulométrico

- ✓ Tras completar cada tiempo de molienda, pesar 100 g de mineral molido de cada prueba para llevar a cabo el análisis granulométrico.

5.2.2.3 Resultados

➤ Molienda 8 minutos

Tabla 5.4

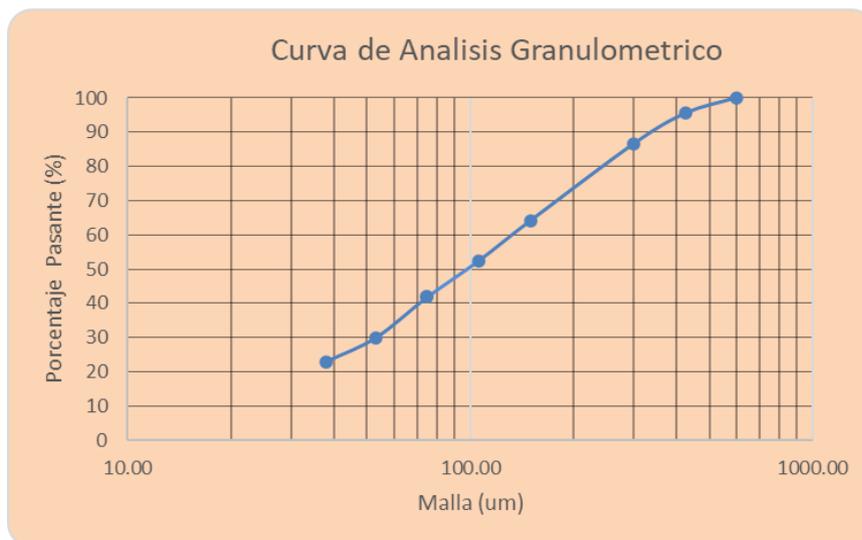
Análisis granulométrico a los 8 min

ANALISIS GRANULOMETRICO - 8 MIN					
MALLA	ABERTURA (μm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASANTE (%)
30.00	600.00	0	0	0	100
40.00	425.00	4.5	4.5	4.5	95.5
50.00	300.00	8.9	8.9	13.4	86.6
100.00	150.00	22.4	22.4	35.8	64.2
140.00	106.00	11.7	11.7	47.5	52.5
200.00	75.00	10.6	10.6	58.1	41.9
270.00	53.00	11.9	11.9	70	30
400.00	38.00	7	7	77	23
-400.00		23	23	100	0
TOTAL		100.00	100.00	D80	255.80 μm

Nota. Fuente Propia.

Figura 5.2

Curva de análisis granulométrico para 8 minutos de molienda



Nota. Fuente propia.

➤ **Molienda 10 minutos**

Tabla 5.5

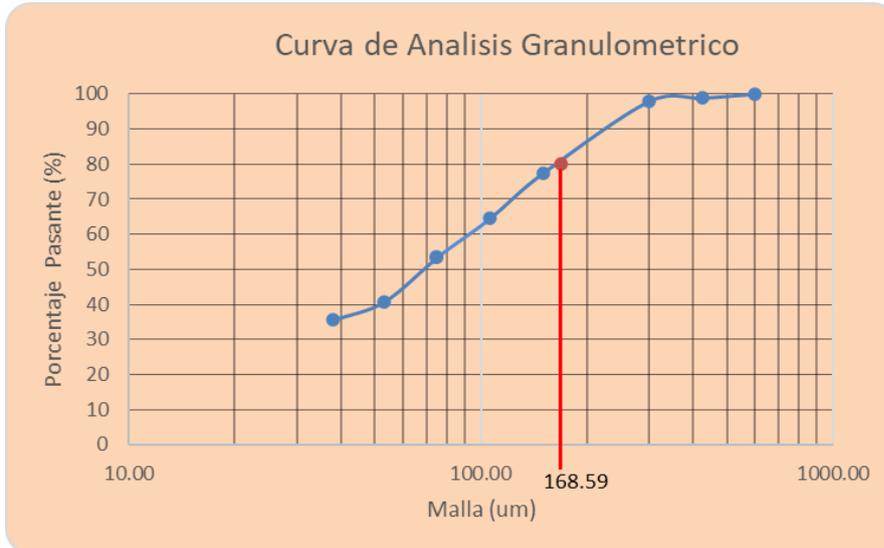
Análisis granulométrico a los 10 min

ANALISIS GRANULOMETRICO - 10 MIN					
MALLA	ABERTURA (μm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PORCENTAJE PASANTE (%)
30.00	600.00	0	0	0	100
40.00	425.00	1.16	1.16	1.16	98.84
50.00	300.00	0.88	0.88	2.04	97.96
100.00	150.00	20.5	20.5	22.54	77.46
140.00	106.00	12.9	12.9	35.44	64.56
200.00	75.00	11.2	11.2	46.64	53.36
270.00	53.00	12.7	12.7	59.34	40.66
400.00	38.00	5.2	5.2	64.54	35.46
-400.00		35.46	35.46	100	0
TOTAL		100.00	100.00	D80	168.59 μm

Nota. Fuente propia

Figura 5.3 Curva de análisis granulométrico para 10 minutos de molienda

Curva de análisis granulométrico para 10 minutos de molienda



Nota. Fuente propia

➤ **Molienda 12 minutos**

Tabla 5.6

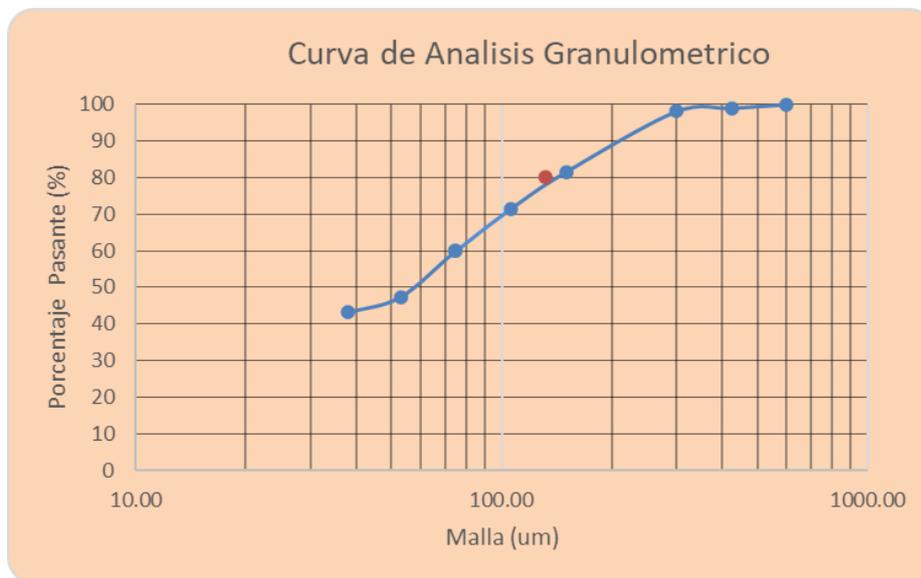
Análisis granulométrico a los 12 min

ANÁLISIS GRANULOMETRICO - 12 MIN					
MALLA	ABERTURA	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE PASANTE
	(μM)	(G)	(%)	(%)	(%)
30.00	600.00	0	0	0	100
40.00	425.00	1.01	1.01	1.01	98.99
50.00	300.00	0.9	0.9	1.91	98.09
100.00	150.00	16.5	16.5	18.41	81.59
140.00	106.00	10.1	10.1	28.51	71.49
200.00	75.00	11.5	11.5	40.01	59.99
270.00	53.00	12.575	12.575	52.585	47.415
400.00	38.00	4.2	4.2	56.785	43.215
-400.00		43.215	43.215	100	0
TOTAL		100.00	100.00	D80	135.55 μm

Nota. Fuente Propia

Figura 5.4

Curva de análisis granulométrico para 12 minutos de molienda



Nota. Fuente propia.

El objetivo de realizar estas pruebas es de conocer el D_{80} del mineral a procesar y obtener una mejor recuperación en la etapa de flotación.

Tabla 5.7

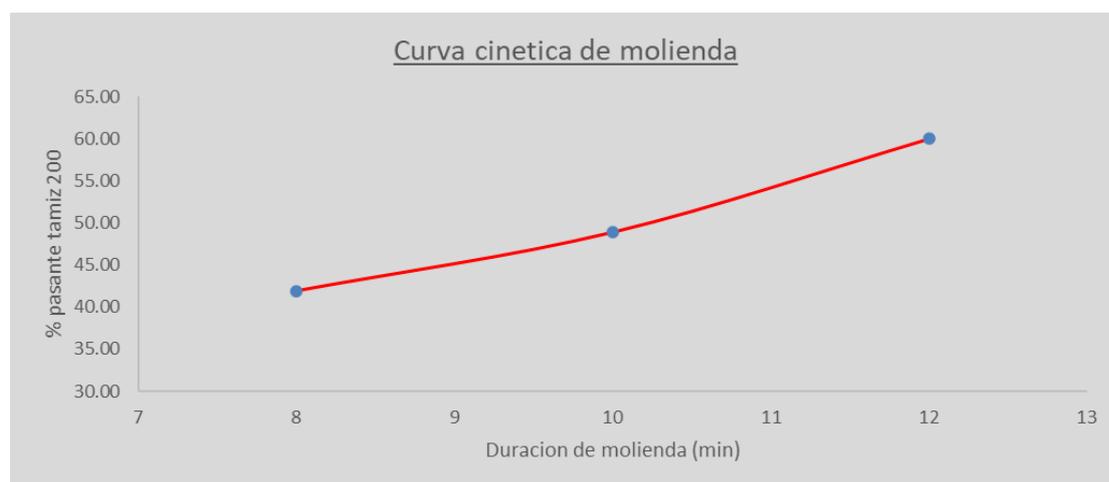
Resultados de molienda y % pasante en tamiz 200

Prueba	Duración de Molienda (min)	Cantidad de Muestra (g)	% Pasante en Tamiz 200
1	8	100	41.90
2	10	100	48.88
3	12	100	59.99

Nota. Fuente propia

Figura 5.5

Curva cinética de molienda: relación entre duración de molienda y % pasante en tamiz 200



Nota. Fuente propia.

La gráfica de figura 5.5 muestra que, al incrementar el tiempo de molienda, aumenta el porcentaje de mineral fino que pasa por el tamiz 200. Esto indica que tiempos de molienda más largos producen un mineral más fino.

5.2.3 Aplicación del método de mínimos cuadrados

Tabla 5.8

Cálculo de molienda y pasante en malla 200

Prueba (N)	Tiempo de Molienda (X) (min)	Pasante en Malla 200 (Y) (%)	X ²	X Y	Y ²
1	8	41.90	64	335.20	1755.61
2	10	48.88	100	488.80	2389.25
3	12	59.99	144	719.88	3598.80
Σ	30	150.77	308.00	1543.88	7743.66

Nota. Fuente Propia.

Utilizando los datos de la tabla 5.8, se elabora la curva de cinética de molienda mediante el método de mínimos cuadrados, empleando las ecuaciones que se detallan a continuación:

$$Y = bX + a \quad (3)$$

$$b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{N} \quad (5)$$

$$r = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (6)$$

Reemplazando los datos de la tabla 5.8 en las ecuaciones (3), (4), (5), (6) obtenemos la ecuación de la curva cinética de molienda.

$$b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{3(1543.88) - 30(150.77)}{3(308) - (30)^2} = 4.52$$

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{N} = \frac{150.77 - 4.52(30)}{3} = 5.03$$

$$r = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} = 0.99$$

Al reemplazar los valores calculados a partir de las ecuaciones (4) y (5) en la ecuación (3), se obtiene la expresión lineal que describe la relación establecida.

$$Y = 4.52X + 5.03 \quad (7)$$

Utilizando la ecuación (7), se pueden calcular los tiempos de molienda necesarios para obtener los porcentajes deseados de material pasante por la malla -200 (35%, 45% y 65%). Los resultados de estos cálculos se presentan detalladamente en la tabla 5.9, que proporciona una relación directa entre el tiempo de molienda y el porcentaje de material fino alcanzado

Tabla 5.9

Relación entre % pasante en malla 200 y tiempo de molienda

% Pasante - Malla 200 ("Y")	Tiempo de Molienda ("X") (min)
35.00	6.63
45.00	8.84
65.00	13.27

Nota. Fuente propia.

5.2.4 Gravedad específica del mineral

Se realizó 3 pruebas en condiciones similares, el uso de 3 probetas de la misma capacidad y tamaño (100 ml), 30 gramos de mineral preparado, malla 10 y secado para eliminar toda la humedad.

5.2.4.1 Herramientas, equipos y materiales.

Tabla 5.10

Herramientas, materiales para gravedad específica

Categoría	Elemento	Especificación
Equipos	Balanza Sartoriusx	1000g
	Calculadora	Classpad FX400
Herramientas	Probeta	aforada clase "A"
	Pizeta	plástico
	Embudo	
Materiales	Mineral	30 g (100% malla -10)
	Agua destilada	

Nota. Fuente propia.

5.2.4.2 Metodología

I. Pesado del Mineral

Preparar 30 g de mineral para cada una de las tres pruebas.

II. Medición del Volumen Inicial de Agua

Verter 100 ml de agua destilada en la probeta, midiendo con precisión el volumen inicial.

III. Incorporación del Mineral

Agregar los 30 g de mineral al agua en la probeta. Mezclar suavemente para asegurar una dispersión uniforme del mineral en el agua y luego dejar la mezcla en reposo.

IV. Medición del Volumen Final

Después del reposo, registrar el volumen final en la probeta para observar cualquier variación debido a la adición del mineral.

Tabla 5.11

Determinación de la gravedad específica del mineral

Prueba	Peso del Mineral (g)	Volumen Inicial de Agua (ml)	Volumen Final (ml)	Cambio de Volumen (ml)	Gravedad Específica
1	10	50	54	4	2.50
2	10	50	53	3	3.33
3	10	50	54.5	4.5	2.22
Promedio					2.69

Nota. Fuente propia.

La gravedad específica del mineral ha sido determinada en 2.69.

5.3 Prueba cinética de flotación

Considerando la importancia de esta variable para la investigación, se llevó a cabo una prueba de flotación en la que se obtuvieron concentrados en distintos intervalos de tiempo. Las espumas fueron recolectadas en recipientes separados en los momentos correspondientes a 2, 5, 8 y 12 minutos. El objetivo de esta prueba fue establecer la ecuación de la cinética de flotación, lo que permitirá determinar el tiempo óptimo para maximizar la recuperación de minerales valiosos en las espumas.

5.3.1 Equipo y reactivos utilizados

Tabla 5.12

Equipos y reactivos para la prueba de flotación

Categoría	Elemento	Especificación
Equipos	Celda de flotación – Denver	Capacidad 2 litros
	Balanza analítica	-
	pH – metro	-
Materiales	Mineral pulverizado	440 g
	Jeringas de alta precisión	-
	Probetas	Capacidad 1litro
	Paletillas	-
	Bandejas plásticas	
	Reactivos	Colector Z-6, A-404, D-250 y Cal

Nota. Fuente propia.

5.3.2 Procedimiento para cinética de flotación

I. Recolección de Espumas

- ✓ Extraer las espumas de flotación a los tiempos de 2, 5, 8 y 12 minutos, obteniendo así concentrados correspondientes a cada intervalo de tiempo. Colocar cada muestra en bandejas separadas para su manejo adecuado.

II. Secado y Preparación de Muestras

- ✓ Secar los concentrados en sus bandejas respectivas, pesar cada uno y, posteriormente, enviarlos al laboratorio para el análisis químico correspondiente.

III. Análisis Metalúrgico

- ✓ Realizar un balance metalúrgico de las muestras obtenidas para determinar la constante cinética de flotación.

Para determinar la constante cinética "K", se aplica la fórmula desarrollada por García Zúñiga (1935). (García Zúñiga, 1935). Ver ecuación (2).

Al linealizar la ecuación (2), se tiene una expresión simplificada facilitando los cálculos necesarios. Ver ecuación (8)

$$\ln\left(\frac{R_{\infty}-R_t}{R_{\infty}}\right) = -Kt \quad (8)$$

En la tabla 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 se presentan los parámetros de operación utilizadas en la flotación por espumas.

Tabla 5.13

Parámetros de molienda

Parámetro de Molienda	Unidad	Valor
Granulometría	% (-200 malla)	60
Gravedad Específica	-	2.69
Peso de Mineral	G	440
Volumen de Agua	ml	1000
% de Sólidos	%	30.56

Nota. Fuente propia.

Tabla 5.14

Parámetros de acondicionamiento y flotación

Parámetro de Acondicionamiento y flotación	Unidad	Valor
Velocidad de acondicionamiento	RPM	1200
Tiempo de acondicionamiento	min	5
Velocidad de flotación	RPM	1600
Tiempo de flotación	min	2, 5, 8, 12

Nota. Fuente propia.

Tabla 5.15*Reactivos y dosificación para la prueba de flotación*

Reactivos y dosificación	Valor	Unidad
Colector Z-6	34.09	g/tn
Dosificación de colector Z-6	0.3	ml
Colector secundario A-404	68.18	g/tn
Dosificación de colector secundario A-404	0.3	ml
Ph	9.5	-
Cal	0.4	g
Espumante D-250	0.3	ml

Nota. Fuente propia.

Tabla 5.16*Resultados de flotación: distribución de peso, ley y recuperación de cobre por producto*

Tiempo de Flotación (min)	Producto	Peso (g)	Leyes (%Cu)	Contenido Metálico (Cu)	Recuperación Parcial (%)	Recuperación Acumulada (%)
0	Cabeza	440	5.6	24.64	100.00	0.00
2	Concentrado 01	68.79	16.75	11.52	46.76	46.76
5	Concentrado 02	55.13	12.42	6.85	27.79	74.55
8	Concentrado 03	32.72	8.43	2.76	11.19	85.75
12	Concentrado 04	15.42	8.01	1.24	5.01	90.76
-	Relave	267.94	0.85	2.28	9.24	-

Nota. La recuperación acumulada del 90.76% refleja una flotación eficiente, pero el 9.24% de cobre en el relave indica oportunidad de mejora en las etapas finales, Fuente propia.

La tabla 5.17 muestra el balance metalúrgico, incluyendo el tiempo de flotación y el %R para cada etapa del proceso.

Aplicando la ecuación (8) a estos datos, se obtiene la tabla 5.17, los cuales permiten determinar la constante (K).

Tabla 5.17

Cálculos de tiempo de flotación y recuperación acumulada de cobre con transformación de variables

N° de Prueba	Tiempo de Flotación (X)	Recuperación Acumulativa R_t (%Cu)	Valor Transformado (Y)	Producto XY	X^2
1	2	46.76	-0.71	-1.42	4
2	5	74.55	-1.66	-8.3	25
3	8	85.75	-2.69	-21.52	64
4	12	90.76	-4.31	-51.72	144
Total Σ	27	-	-9.37	-82.96	237

Nota. Fuente propia.

A partir de la tabla 5.18, se determina el valor de K utilizando el método de mínimos cuadrados. Aplicando la ecuación (4), se obtiene el siguiente resultado

$$b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{4(-94.13) - (36)(-9.37)}{4(338) - (36)(36)} = -0.7$$

$$R_{\infty} = 92$$

A continuación, los valores de K y R_{∞} se sustituyen en la ecuación (2) para calcular la cinética de flotación:

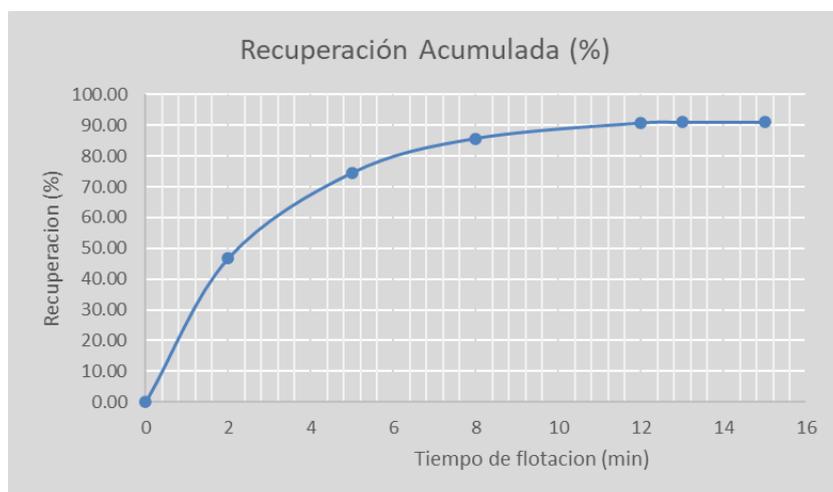
$$R_t = 92(1 - e^{-kt}) = 92(1 - e^{-0.7t}) \quad (9)$$

Usando los datos de la tabla 5.17, se elabora una gráfica del tiempo de flotación en función del porcentaje de recuperación acumulada. En la figura 5.6 se observa que, para tiempos superiores a 12 minutos, el porcentaje de recuperación muestra poca variación.

Asimismo, se aprecia que, con tiempos de flotación inferiores a minutos, la recuperación no alcanza el 92%.

Figura 5.6

Curva de recuperación acumulada en función del tiempo de flotación



Nota. Fuente propia.

5.4 Diseño experimental de la prueba de flotación

En el proceso múltiples variables afectan los resultados de recuperación. En esta investigación, se seleccionaron tres factores clave: la granulometría, la dosificación del colector Z-6 y la del colector secundario A-404. Estas variables fueron elegidas por su relevancia en la recuperación de minerales valiosos y su impacto en los resultados experimentales (Sampieri, 2014).

Para el estudio, se empleó un diseño factorial completo con ocho pruebas, permitiendo analizar tanto los efectos individuales de cada variable como sus interacciones en la eficiencia de recuperación y el grado del concentrado de Cu. La tabla 5.18 presenta los niveles alto, bajo y el punto central de cada variable, facilitando el análisis de sus efectos sobre el proceso (Crozier, 1992).

Tabla 5.18*Niveles de dosificación y granulometría en el diseño experimental*

Variables	Nivel Bajo (-)	Nivel medio	Nivel Alto (+)
Dosificación Z-6 (g/T)	28.41	34.09	39.77
Dosificación A-404 (g/T)	34.09	45.46	56.82
Granulometría (% -200M)	41.90	50.95	59.99

Nota. Fuente propia.**5.4.1 Diseño factorial**

Para un diseño factorial 2^K con tres variables, se requiere ejecutar 2^3 experimentos, lo que equivale a 8 pruebas. Además, se incluyen tres pruebas en el punto central, conocidas como réplicas centrales. Ver tabla 5.20

Tabla 5.19*Condiciones de dosificación y granulometría en ensayos de flotación*

N ensayo	Dosificación Z-6 (g/T)	Dosificación A-404 (g/T)	Granulometría (% -200M)
1	28.41	34.09	41.90
2	39.77	34.09	41.90
3	28.41	56.82	41.90
4	39.77	56.82	41.90
5	28.41	34.09	59.99
6	39.77	34.09	59.99
7	28.41	56.82	59.99
8	39.77	56.82	59.99
9	34.09	45.46	50.95
10	34.09	45.46	50.95
11	34.09	45.46	50.95

Nota Fuente propia.

Tabla 5.20

Diseño experimental: escalas natural y codificada con respuestas

Prueba	Escala Natural			Escala Codificada			Respuesta
	Z1	Z2	Z3	X1	X2	X3	
1	28.41	34.09	41.90	-1	-1	-1	82.67
2	39.77	34.09	41.90	+1	-1	-1	87.01
3	28.41	56.82	41.90	-1	+1	-1	83.04
4	39.77	56.82	41.90	+1	+1	-1	87.16
5	28.41	34.09	59.99	-1	-1	+1	89.60
6	39.77	34.09	59.99	+1	-1	+1	91.20
7	28.41	56.82	59.99	-1	+1	+1	88.56
8	39.77	56.82	59.99	+1	+1	+1	90.81
9	34.09	45.46	50.95	0	0	0	88.77
10	34.09	45.46	50.95	0	0	0	88.07
11	34.09	45.46	50.95	0	0	0	88.20

Nota. Fuente propia.

5.5 Procedimiento de flotación

5.5.1 Acondicionamiento del mineral

Para cada ensayo, se cargaron 440 g de mineral en una celda capacidad de 1 litro. El %S en la pulpa fue ajustado según el diseño experimental, manteniéndose en el nivel de 30.56%.

$$\%Solidos = \frac{\text{Peso de los solidos}}{\text{Peso total de la pulpa}} \times 100 \quad (10)$$

- Peso de solidos: 440 g
- Peso del agua: 1 litro equivalente a 1000g (densidad del agua 1g/cm³)

Peso total de la pulpa será la suma del peso del H₂O y el peso del mineral:

$$\text{Peso total de la pulpa} = 440g + 1000g = 1440g$$

5.5.2 Cálculo de porcentaje de sólidos

$$\%Solidos = \frac{440g}{1440g} \times 100 = 30.56\%$$

5.5.3 Preparación de reactivos y secuencia operativa

5.5.3.1 Colector Z-6

- Para 28.41 g/tn

$$\frac{28.41g}{tn} \times 100ml \times 440g}{5g \times 10^6g/tn} = 0.25ml$$

- Para 39.77 g/tn

$$\frac{39.77g}{tn} \times 100ml \times 440g}{5g \times 10^6g/tn} = 0.35ml$$

5.5.3.2 Colector secundario A-404

- Para 34.09 g/tn

$$\frac{34.09g}{tn} \times 50ml \times 440g}{5g \times 10^6g/tn} = 0.15ml$$

- Para 56.82 g/tn

$$\frac{56.82g}{tn} \times 50ml \times 440g}{5g \times 10^6g/tn} = 0.25ml$$

5.5.3.3 Espumante D-250

$$\frac{56.82g}{tn} \times 50ml \times 440g}{5g \times 10^6g/tn} = 0.25ml$$

5.5.4 Recolección de espumas y concentrados

En los 8 ensayos experimentales realizados, la recolección de espumas y concentrados fue una etapa clave para evaluar la recuperación de Cu en función de las condiciones de operación. Cada ensayo fue llevado a cabo siguiendo el diseño experimental previamente

establecido, recolectando espumas en intervalos regulares para garantizar una evaluación precisa de los resultados.

Procedimiento de la recolección

A. Inicio de la flotación

- En cada uno de los 8 ensayos, después del acondicionamiento del mineral y la adición de los reactivos, se inyectó aire en la celda de flotación, lo que permitió que el mineral de cobre se adsorba a las burbujas formadas por el espumante D-250.
- A medida que las burbujas ascendieron a la superficie del medio, se formó una capa de espuma con partículas de cobre, que fue recolectada de forma continua.

B. Intervalos de recolección

- La recolección de espumas se realizó en intervalos regulares de 1 minutos durante los 12 minutos que duró cada ensayo.
- En cada intervalo, se utilizó una pala para quitar la burbuja de la superficie de la celda y depositarla en un recipiente designado para el análisis posterior.

5.5.5 Separación y recolección del concentrado

Filtrado del concentrado:

La espuma recolectada en los 8 ensayos fue llevada directamente a la estufa para su secado, sin pasar por un proceso de filtrado. Esto permitió eliminar el exceso de agua presente en las espumas y obtener el concentrado seco de manera eficiente.

Una vez recolectadas, las muestras fueron transferidas a un horno donde se mantuvieron a 105°C durante 1.5 horas, asegurando la completa eliminación de la humedad.

Tras el secado, cada muestra de concentrado fue pesada con una balanza analítica para registrar el peso seco, lo que facilitó la obtención de datos precisos para los cálculos de recuperación de cobre.

5.6 Determinación de ley de Cu en el concentrado y relave

El análisis de la ley de cobre en el concentrado y relave fue realizado por un laboratorio externo JE-AL ENTERPRISE s.a.c. A partir de los resultados obtenidos, se calcularon las recuperaciones de cobre y se generaron gráficas de la distribución de cobre en los productos para cada uno de los ensayos.

5.6.1 Resultados del análisis químico

Tabla 5.21

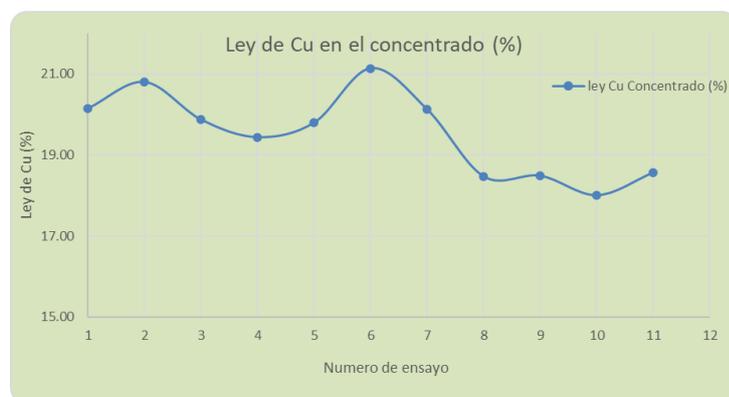
Resultados de ensayos de flotación

Numero de Prueba	% Cu Cabeza	ley Cu Concentrado (%)	Ley Cu en relave (%)
1	5.6	20.15	1.26
2	5.6	20.80	0.95
3	5.6	19.87	1.24
4	5.6	19.44	0.96
5	5.6	19.80	0.78
6	5.6	21.14	0.65
7	5.6	20.12	0.85
8	5.6	18.47	0.71
9	5.6	18.49	0.86
10	5.6	18.01	0.92
11	5.6	18.57	0.90

Nota. Fuente propia.

Figura 5.7

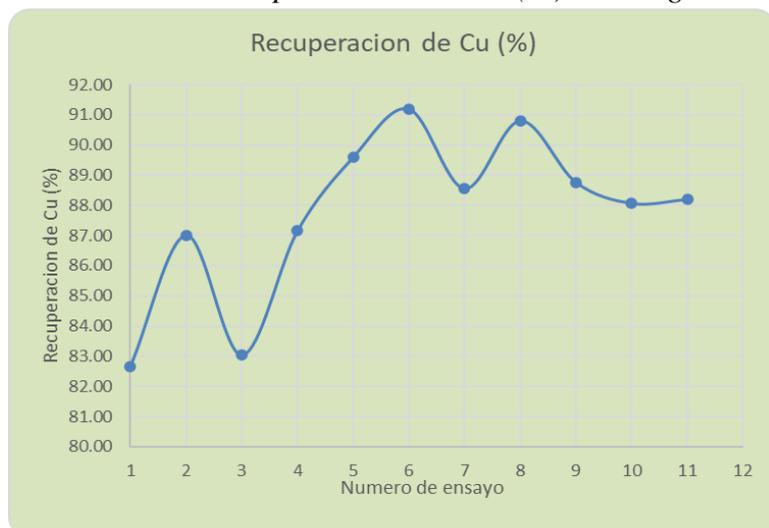
Variación de la ley de Cu en el concentrado a lo largo de los ensayos



Nota Fuente propia.

Figura 5.8

Evolución de la recuperación de cobre (%) a lo largo de los ensayos



Nota. Fuente propia.

5.7 Balance metalúrgico

5.7.1.1 Cálculo de balance metalúrgico

Los valores de recuperación de cobre, que se menciona en la tabla 5.22, se calcularon usando

la siguiente formula:

$$R_{CuC}(\%) = \frac{Cu \text{ en concentrado } (\%) \times \text{Peso del concentrado}(g)}{Cu \text{ en la cabeza}(\%) \times \text{Peso del mineral tratado}(g)} \times 100 \quad (11)$$

Tabla 5.22

Resultados de ensayos: peso, ley y recuperación de Cu en concentrado y relave

Ley de cabeza	Peso de alimentación (g)	Peso Concentrado (g)	ley Cu Concentrado (%)	Peso Relave (g)	Ley Cu en relave (%)	Recuperación de Cu (%)	Cabeza calculada	ERROR
5.6	440	101.09	20.15	338.91	1.26	82.67	5.6000	0.00%
5.6	440	103.07	20.80	336.93	0.95	87.01	5.5999	0.00%
5.6	440	102.98	19.87	337.02	1.24	83.04	5.6003	-0.01%
5.6	440	110.48	19.44	329.52	0.96	87.16	5.6002	0.00%
5.6	440	111.50	19.80	328.50	0.78	89.60	5.5998	0.00%
5.6	440	106.30	21.14	333.70	0.65	91.20	5.6002	0.00%
5.6	440	108.45	20.12	331.55	0.85	88.56	5.5996	0.01%
5.6	440	121.14	18.47	318.86	0.71	90.81	5.5997	0.01%
5.6	440	118.30	18.49	321.70	0.86	88.77	5.6001	0.00%
5.6	440	120.49	18.01	319.51	0.92	88.07	5.5999	0.00%
5.6	440	117.03	18.57	322.97	0.90	88.20	5.5998	0.00%

Nota. Fuente propia.

El balance metalúrgico realizado demuestra una precisión sobresaliente, con errores insignificantes entre la ley de cabeza teórica (5.6% Cu) y la calculada, fluctuando entre 0.000% y 0.001%, lo que confirma un cierre eficiente del proceso. Las recuperaciones de cobre fueron elevadas, variando entre 82.67% y 91.20%, siendo la sexta prueba la de mejor rendimiento. Esto pone de manifiesto la eficacia del proceso de flotación y la correcta elección de las condiciones operativas y los reactivos utilizados.

Tabla 5.23

Condiciones operativas para flotación

Parámetros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Peso mineral (g)	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440
%-200M	41.90	41.90	41.90	59.99	59.99	59.99	59.99	59.99	50.95	50.95	50.95
pH	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
RPM acondicionamiento	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
RPM Flotación	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Z-6 (g/tn)	28.41	39.77	28.41	39.77	28.41	39.77	28.41	39.77	34.09	34.09	34.09
A-404 (g/tn)	34.09	34.09	56.82	56.82	34.09	34.09	56.82	56.82	45.46	45.46	45.46
D-250 (g/tn)	56.82	56.82	56.82	56.82	56.82	56.82	56.82	56.82	56.82	56.82	56.82
Cal (g)	0.40	0.45	0.40	0.45	0.40	0.45	0.40	0.40	0.38	0.38	0.38
Tiempo de flotación (min)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Tiempo de acondicionamiento (min)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Nota. Fuente propia.

Tabla 5.24*Balance metalúrgico pruebas de flotación*

Ensayo N°	Producto	Peso (g)	% Peso	Ensayo (%Cu)	Contenido Metálico (g Cu)	% Distribución Cu	Ratio	Recuperación % Cu
1	Cabeza	440	100.01	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	101.09	22.98	20.15	20.37	82.67	0.83	82.67
	Relave	338.91	77.03	1.26	4.27	17.33	-	17.33
2	Cabeza	440	100.01	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	103.07	23.43	20.80	21.44	87.01	0.87	87.01
	Relave	336.93	76.58	0.95	3.20	12.99	-	12.99
3	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	102.98	23.40	19.87	20.46	83.04	0.83	83.04
	Relave	337.02	76.60	1.24	4.18	16.96	-	16.96
4	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	110.48	25.11	19.44	21.48	87.18	0.87	87.18
	Relave	329.52	74.89	0.96	3.16	12.82	-	12.82
5	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	111.50	25.34	19.80	22.08	89.61	0.90	89.61
	Relave	328.5	74.66	0.78	2.56	10.39	-	10.39
6	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	106.30	24.16	21.14	22.47	91.19	0.91	91.19
	Relave	333.7	75.84	0.65	2.17	8.81	-	8.81
7	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	108.45	24.65	20.12	21.82	88.56	0.89	88.56
	Relave	331.55	75.35	0.85	2.82	11.44	-	11.44
8	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	99.96	1.00	399.96
	Concentrado	121.14	27.53	18.47	22.37	90.79	0.91	90.79
	Relave	318.86	72.47	0.71	2.26	9.17	-	9.17
9	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	300.00
	Concentrado	118.30	26.89	18.49	21.87	88.76	0.89	88.76
	Relave	321.7	73.11	0.86	2.77	11.24	-	11.24
10	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	200.00
	Concentrado	120.49	27.38	18.01	21.70	88.07	0.88	88.07
	Relave	319.51	72.62	0.92	2.94	11.93	-	11.93
11	Cabeza	440	100.00	5.60	24.64	100.00	1.00	100.00
	Concentrado	117.03	26.60	18.57	21.73	88.19	0.88	88.19
	Relave	322.97	73.40	0.90	2.91	11.81	-	11.81

Nota. Fuente propia.

Para calcular el contenido de metálico, ratio, % de distribución del Cu se utilizó las siguientes formulas. Ver las ecuaciones (12), (13), (14).

$$\text{Contenido Metalico (g Cu)} = \frac{\text{Peso de la cabeza (g)} \times \% \text{Cu en la Cabeza}}{100} \quad (12)$$

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Contenido Metalico del Concentrado}}{\text{Contenido Metalico de la Cabeza}} \quad (13)$$

$$\% \text{Distribucion Cu} = \frac{\text{Contenido Metalico del producto}}{\text{Contenido Metalico Total en la alimentacion}} \times 100 \quad (14)$$

CAPITULO VI

ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se utiliza el diseño factorial de experimentos, una técnica que optimiza la planificación de ensayos al permitir obtener la información necesaria con el menor número de pruebas posible.

El diseño factorial es un tipo de experimento que facilita el análisis de los efectos que diversos factores pueden tener sobre una respuesta específica. Durante el experimento, la modificación simultánea de los niveles de todos los factores, en lugar de hacerlo de forma individual, permite analizar cómo interactúan entre sí.

Es importante señalar que el término "factor" corresponde a la "variable independiente" en todos sus niveles, mientras que el término "respuesta" equivale a la "variable dependiente".

6.1 Diseño factorial 2^3

Se emplea en experimentos donde intervienen múltiples factores, permitiendo evaluar el impacto conjunto de estos sobre una respuesta determinada. Un tipo específico de este diseño es el 2^k , en el cual cada factor cuenta únicamente con dos niveles (Montgomery, 2004).

En esta investigación, se ha seleccionado el diseño factorial 2^3 , que implica el uso de tres factores o variables independientes, cada uno con dos niveles. Estos niveles, definidos de manera convencional, se etiquetan como "bajo" y "alto". En este contexto, los niveles bajo y alto se representan mediante los valores "-1" y "+1", respectivamente.

La cantidad total de experimentos necesarios se determina a través de la siguiente fórmula:

$$N = 2^k + r \tag{15}$$

Donde:

N: Corresponde al número de pruebas experimentales.

2: Representa niveles de cada factor.

K: Indica la cantidad de variables (en este caso, 3).

r: Denota las réplicas en el punto central.

De acuerdo con la ecuación, el total de pruebas experimentales necesarias para llevar a cabo el diseño factorial es de 11, distribuidas de la siguiente manera: 8 ensayos combinadas con 3 réplicas.

Al trabajar con tres factores, denominados A, B y C, cada uno con dos niveles, se emplea un diseño factorial 2^3 . En este contexto, es posible representar las ocho combinaciones de tratamientos mediante un cubo, como se observa en la figura correspondiente. Para indicar los niveles de cada factor, se usa la notación “+” para el nivel alto y “-” para el nivel bajo. Las ocho combinaciones del diseño 2^3 pueden organizarse en una tabla, la cual a veces se llama matriz del diseño. El orden estándar de los tratamientos se expresa como (1), a, b, ab, c, ac, bc y abc (Montgomery, 2004, p. 228).

Hay tres notaciones principales para describir las combinaciones en un diseño 2^3 . La primera es la notación geométrica, que emplea “+” y “-”. La segunda asigna letras minúsculas para identificar cada combinación de tratamientos. La tercera notación, en cambio, utiliza "1" para el alto nivel y "0" para el bajo nivel, en lugar de los símbolos “+” y “-”. Todas estas notaciones se ilustran en la Tabla 6.1 para el diseño 2^3 .

Tabla 6.1

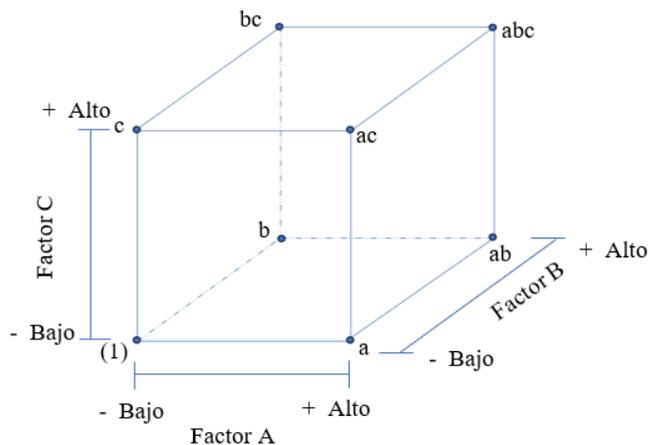
Codificación de factores y etiquetas binarias para las corridas experimentales

Corrida	Factor A	Factor B	Factor C	Etiquetas	Binaria A	Binaria B	Binaria C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Nota. El cuadro representa un diseño factorial 2^3 , codificando combinaciones de los factores A, B y C en niveles (+, -) y binarios para analizar efectos principales e interacciones

Figura 6.1

Representación gráfica de los niveles de factores en un diseño factorial 2^3



Nota. El diagrama sirve para visualizar las combinaciones de niveles (bajo y alto) en un diseño factorial 2^3 , permitiendo identificar efectos principales, interacciones y cómo los factores influyen en la respuesta del experimento, (Montgomery, 2004).

6.2 Análisis del diseño factorial 2^3 con réplicas en el centro experimental

Tras haber presentado los aspectos esenciales del diseño factorial 2^3 , esta sección se centrará en el análisis del uso de réplicas, particularmente en el punto central del diseño experimental.

Las réplicas consisten en ejecutar una o varias repeticiones de corridas experimentales bajo la misma configuración de factores, pero de forma independiente unas de otras. Estas repeticiones pueden aplicarse a combinaciones específicas de niveles de factores, a conjuntos de combinaciones, o incluso abarcar el diseño completo.

El diseño factorial 2^k se basa en el supuesto de que la relación entre los factores y las respuestas puede modelarse de manera lineal. Si esta condición se cumple, el modelo debería predecir adecuadamente el comportamiento en todos los puntos del diseño, incluyendo los puntos centrales. Aunque la linealidad no sea perfecta, el modelo podría aún proporcionar una aproximación satisfactoria. Sin embargo, si la predicción en ciertas áreas, especialmente en el punto central, no es precisa, esto podría indicar que el modelo lineal no es suficiente para capturar las respuestas en esa zona, lo cual sugiere la presencia de curvatura en la relación. Para evaluar este posible efecto de curvatura, es recomendable realizar pruebas adicionales en el punto central del diseño (Rivero, 2008).

6.2.1 Variables consideradas en el diseño factorial

La Tabla 5.19 muestra las variables independientes consideradas en el diseño factorial junto con sus niveles mínimo y máximo. Asimismo, se destacan los puntos centrales del diseño, cuyos valores se calculan promediando los niveles superior e inferior de cada variable (Montgomery, 2004).

6.2.1.1 Variable dependiente

Se define como variable dependiente el %R de Cu. A partir de la información previamente recopilada, se establece el diseño experimental, el cual consta de ocho combinaciones de tratamientos y 03 réplicas.

La Tabla 5.21 detalla las variables independientes tanto en su escala natural (denominadas como Z1, Z2 y Z3) como en su escala codificada (identificadas como X1, X2 y X3). Además, se incluyen las respuestas correspondientes a cada combinación de factores.

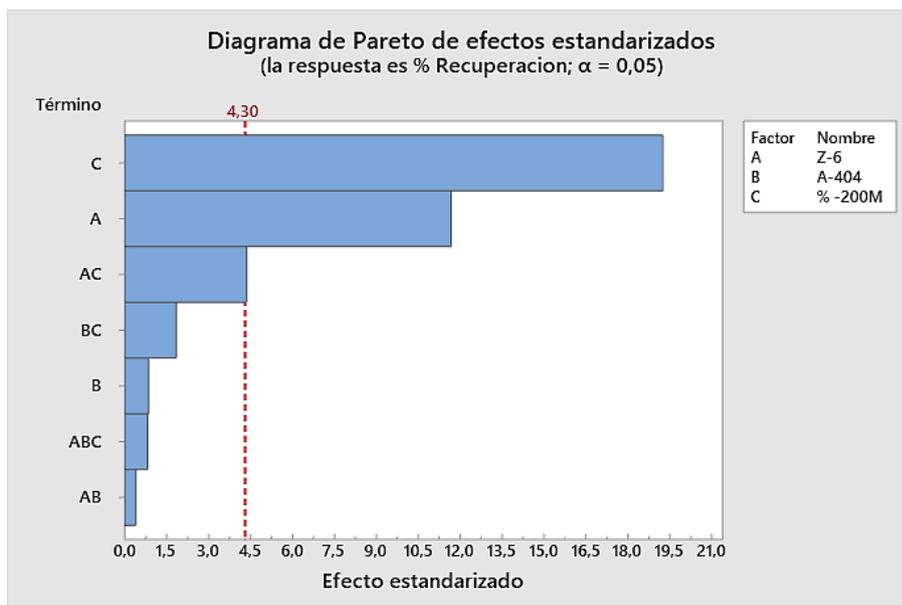
6.2.2 Análisis de efectos de las variables

Mediante el diseño factorial, es posible analizar 03 efectos principales: X₁, X₂ y X₃; además de 03 interacciones dobles (X₁X₂, X₁X₃, X₂X₃) y 01 interacción triple (X₁X₂X₃).

La Figura 6.2 muestra el diagrama de Pareto de los efectos, permitiendo observar con claridad la magnitud de cada uno.

Figura 6.2

Diagrama de Pareto de los efectos (la respuesta es % recuperación; $\alpha = 0.05$)



Nota. Generado con Minitab, el diagrama de Pareto resalta los efectos más influyentes en la recuperación de cobre. Los factores C (% -200M), A (Z-6) y la interacción AC superan el umbral crítico ($\alpha=0.05$), destacándose como los más significativos en el proceso.

El diagrama de Pareto muestra que los factores **C (Pasante -200M (%))** y **A (Z-6 (g/Tn))** son estadísticamente significativos, superando la línea crítica de 4.30, lo que los identifica como los principales determinantes del proceso de recuperación. Las interacciones

y otros factores, incluidos **B (A-404 (g/Tn))** y las combinaciones (**AC, BC, ABC, AB**), no son significativos, ya que no cruzan el umbral crítico, indicando una influencia despreciable en la respuesta. El **Pasante -200M (%)** tiene el mayor efecto, seguido por **Z-6 (g/Tn)**, confirmando que la optimización debe centrarse en estos dos factores clave para maximizar la recuperación.

La línea de referencia crítica de 4.30 en el diagrama de Pareto de efectos estandarizados se determina a partir de una fórmula que utiliza el valor crítico del estadístico t de Student, el cual está vinculado al nivel de significancia ($\alpha=0.05$) establecido en el análisis. Se adjunta Tabla de distribución T Student en el anexo D.

El software nos proporciona un informe detallado del análisis de varianza del cual podemos inferir el modelo factorial el cual se observa en la tabla 6.2.

Tabla 6.2

Análisis de varianza generado por MINITAB 19

<u>Fuente</u>	<u>GL</u>	<u>SC Ajust.</u>	<u>MC Ajust.</u>	<u>Valor F</u>	<u>Valor p</u>
Modelo	8	75,2966	9,4121	67,89	0,015
Lineal	3	70,5060	23,5020	169,53	0,006
Z-6	1	18,9420	18,9420	136,63	0,007
A-404	1	0,1035	0,1035	0,75	0,479
% -200M	1	51,4605	51,4605	371,20	0,003
Interacciones de 2 términos	3	3,1549	1,0516	7,59	0,119
Z-6*A-404	1	0,0231	0,0231	0,17	0,723
Z-6*% -200M	1	2,6565	2,6565	19,16	0,048
A-404*% -200M	1	0,4753	0,4753	3,43	0,205
Interacciones de 3 términos	1	0,0946	0,0946	0,68	0,496
Z-6*A-404*% -200M	1	0,0946	0,0946	0,68	0,496
Curvatura	1	1,5410	1,5410	11,12	0,079
Error	2	0,2773	0,1386		
Total	10	75,5739			

Nota. (GL: grados de libertad, SC Ajust: suma de cuadrados ajustado, MC Ajust: Media Cuadrática Ajustada), MINITAB 19.

- **Valor de F**

El valor F se calcula dividiendo la Media Cuadrática Ajustada (MC Ajust.) de cada término entre la del error:

$$F = \frac{MC \text{ Ajust. del termino}}{MC \text{ Ajust. del error}} \quad (17)$$

Un F elevado sugiere que el término tiene un impacto significativo en la variable de respuesta.

- **Valor de P**

El valor p mide la significancia estadística del término:

- $p < 0.05$: Indica que el término es estadísticamente significativo.
- $p > 0.05$: Indica que el término no tiene un efecto significativo.

Los valores p para estos factores son menores a 0.05 ($p=0.007$ para Z-6 y $p=0.003$ para %Pasante -200M), lo que indica que tienen un efecto significativo en la variable respuesta (recuperación). Esto significa que cualquier cambio en estos factores tendrá un impacto relevante en el proceso, y por lo tanto deben priorizarse en el análisis y optimización del modelo.

- **Curvatura**

La curvatura en un análisis de varianza evalúa si existe un patrón no lineal en la relación entre las variables independientes y la respuesta. Es decir, determina si los efectos de los factores no se ajustan completamente a un modelo lineal simple. En este análisis, la curvatura no resulta significativa (valor $p = 0.707$), lo que indica que no se evidencia un comportamiento no lineal en los datos. Esto sugiere que el modelo lineal es adecuado para explicar la relación entre los factores (Z-6, A-404 y % -200M) y la recuperación de cobre, sin necesidad de incluir términos cuadráticos o no lineales. Este resultado simplifica el modelo,

confirmando que los efectos de los factores son proporcionales dentro del rango estudiado y facilitando la interpretación al centrarse en los factores e interacciones significativas.

- **Error residual**

El error residual, con un valor de 0.2773, representa la variabilidad no explicada por el modelo, atribuida a factores no considerados o variaciones aleatorias. Este bajo valor indica que el modelo describe adecuadamente los datos, atribuyendo la mayor parte de la variación en la recuperación de cobre a los factores estudiados (Z-6, A-404 y % -200M) y sus interacciones significativas, lo que refuerza su confiabilidad.

- **Ajuste general del modelo:**

El ajuste general del modelo evalúa qué tan bien los factores y las interacciones consideradas explican la variabilidad en la respuesta. En este análisis, el modelo completo es estadísticamente significativo (valor $p = 0.015$), lo que indica que logra capturar la mayor parte de la variación en la recuperación de cobre. Además, el bajo error residual y la ausencia de curvatura significativa refuerzan la validez del modelo, sugiriendo que los factores seleccionados (Z-6, A-404 y % -200M) y sus interacciones principales son suficientes para describir el sistema dentro de las condiciones estudiadas.

Tabla 6.3

Indicadores de ajuste del modelo de regresión

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,372335	99,63%	98,17%	*

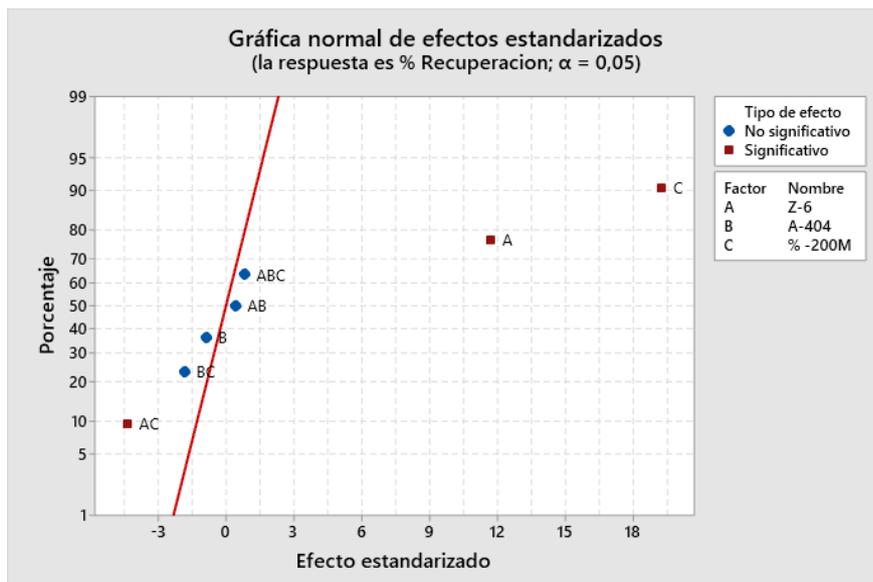
Nota. El modelo muestra un ajuste excelente con un R^2 del 99.63% y un R^2 ajustado de 98.17%, Minitab 19.

El resumen del modelo muestra un ajuste excelente, con un R^2 de 99.63%, lo que indica que el modelo explica casi toda la variación en la recuperación de cobre. Sin embargo, el R^2 ajustado baja ligeramente a 98.17% debido a que este valor penaliza la inclusión de factores innecesarios en el modelo. Este ajuste corrige el R^2 para reflejar únicamente los términos que aportan significativamente a la explicación de la variabilidad, lo que asegura que el modelo no esté sobre ajustado. La desviación estándar residual (S), con un valor de 0.372335, confirma que los valores predichos están muy cerca de los valores observados, reflejando alta precisión en las predicciones. Aunque el R^2 predicho no está calculado en esta tabla, los indicadores presentes sugieren un modelo robusto y confiable para describir y analizar la recuperación de cobre dentro del rango de las condiciones experimentales (Montgomery, 2004).

La grafica normal de los efectos uno de los reportes del software Minitab 19 se observa en la figura 6.3 de los cuales se infiere algunas conclusiones.

Figura 6.3

Gráfica normal de los efectos (la respuesta es % recuperación; $\alpha = 0.05$)

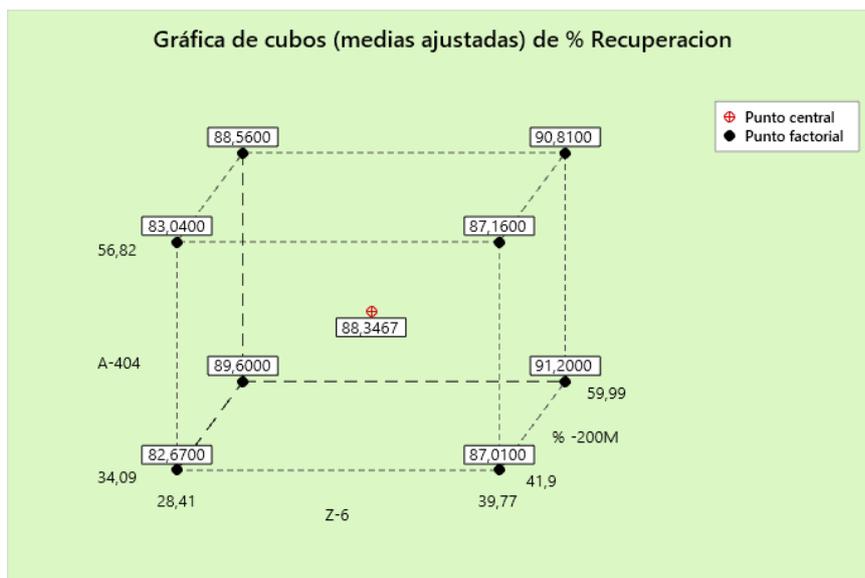


Nota. Factores alejados de la línea central (como C) son significativos porque tienen un efecto mucho mayor que el ruido experimental, Minitab 19.

La gráfica normal de efectos estandarizados muestra cómo los factores y sus interacciones impactan significativamente la respuesta, en este caso, el porcentaje de recuperación. Los puntos representan los efectos estandarizados de los factores, y la línea roja indica el comportamiento esperado si los efectos fueran puramente aleatorios (sin impacto significativo). Los efectos que se desvían notablemente de esta línea, como C (% -200M), A (Z-6) y la interacción AC (Z-6% -200M), son considerados significativos porque su impacto no puede explicarse únicamente por el azar. Los puntos dentro de la línea roja corresponden a factores no significativos (como B y otros términos), mientras que los que están fuera se interpretan como importantes en el modelo, dado que influyen de forma significativa en la respuesta.

Figura 6.4 Gráfica de cubos del % de recuperación

Gráfica de cubos del % de recuperación



Nota. Generado por Minitab 19.

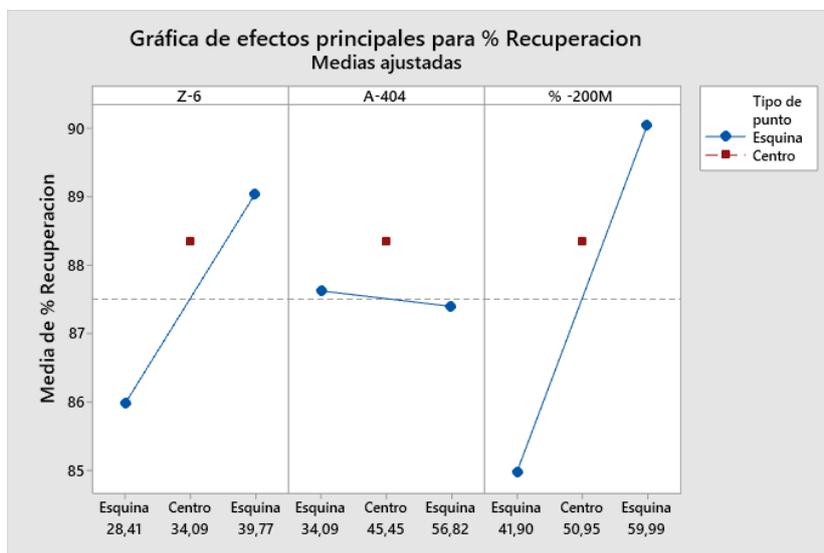
La gráfica de cubos representa cómo los factores principales (Z-6, A-404 y % -200M) influyen en el porcentaje de recuperación, utilizando las medias ajustadas en los puntos factoriales y el punto central del diseño experimental. Cada vértice del cubo corresponde a una combinación de niveles altos y bajos de los factores, mientras que el punto central (en rojo) refleja el promedio de las respuestas en condiciones intermedias, proporcionando una visión general del comportamiento del sistema (Sampieri, 2014).

Los resultados muestran que los valores más altos de recuperación, como 90.81%, se logran cuando % -200M está en su nivel alto y los demás factores están en niveles favorables. En contraste, combinaciones con niveles bajos, como 82.67%, muestran menores porcentajes de recuperación. Las líneas conectando los vértices permiten visualizar cómo las variaciones en los factores afectan la respuesta.

Gráficas factoriales para % Recuperación

Figura 6.5

Efectos principales de Z-6, A-404 y % de -200M sobre la recuperación de cobre



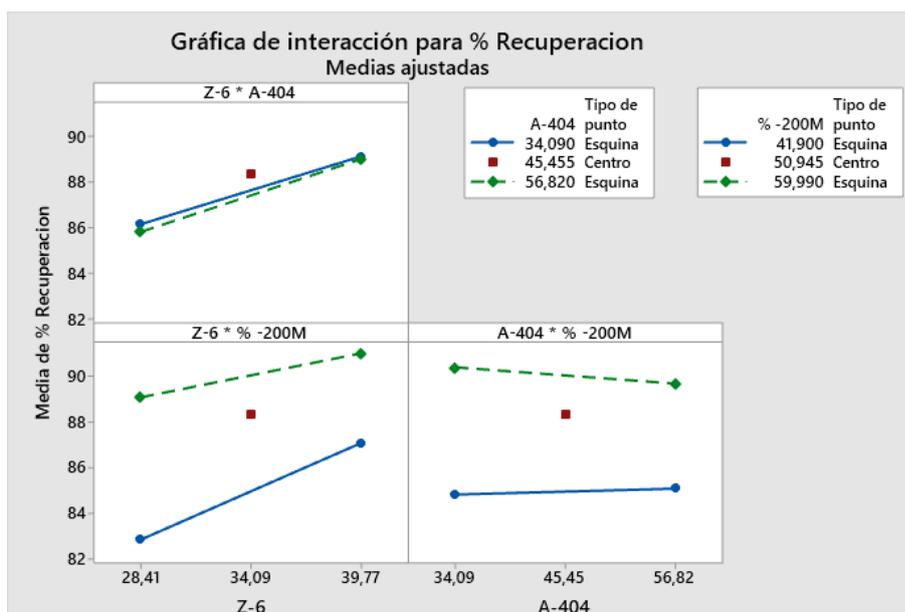
Nota. Generado con Minitab 19, el gráfico muestra los efectos principales de Z-6, A-404 y % -200M en la recuperación de cobre. Los factores Z-6 y % -200M presentan tendencias significativas, destacando su impacto en la respuesta del modelo.

La media ajustada se refiere al promedio de los valores de la respuesta, en este caso el porcentaje de recuperación, después de eliminar el efecto de otros factores o interacciones presentes en el modelo. Esto permite observar el impacto directo de cada factor principal de manera independiente, proporcionando una evaluación más clara de su influencia en la respuesta.

En la gráfica de efectos principales, se observa que el % -200M es el factor más influyente, mostrando un incremento significativo en la recuperación al pasar de niveles bajos (41.90%) a altos (59.99%). El factor Z-6 también tiene un efecto positivo, con un aumento de la recuperación entre el nivel bajo (28.41%) y el nivel central (39.77%). Por otro lado, el impacto de A-404 es menos marcado, con un cambio mínimo entre el nivel bajo (34.09%) y el central (45.65%). La gráfica, junto con las medias ajustadas, permite identificar que % -200M y Z-6 son los factores más críticos para optimizar la recuperación, mientras que A-404 tiene una influencia menos significativa.

Figura 6.6

Interacción para % recuperación (medias ajustadas)



Nota. Generada con Minitab 19, muestra la interacción entre Z-6 y A-404 en el porcentaje de recuperación de cobre, basada en medias ajustadas de los experimentos realizados.

En la figura 6.6 sobre las interacciones, las líneas azul y verde representan los niveles bajo y alto, respectivamente, del tercer factor fijo en cada subgráfico. En el caso de Z-6 * A-404, la línea verde (nivel alto de % -200M) está ligeramente por encima de la azul (nivel bajo de % -200M), indicando que el nivel alto de % -200M incrementa levemente la recuperación en esta interacción. Para Z-6 * % -200M, la separación entre las líneas azul y verde es más pronunciada, mostrando que A-404 en su nivel alto potencia significativamente el efecto combinado de Z-6 y % -200M. Por último, en A-404 * % -200M, las líneas son casi paralelas y cercanas, lo que sugiere que los niveles de Z-6 tienen poca influencia en esta interacción.

En conjunto, los colores destacan cómo el tercer factor modifica la interacción entre los otros dos, siendo más relevante en el caso de Z-6 y % -200M.

6.3 Evaluación de la significancia de efectos en un diseño factorial mediante análisis de varianza

El análisis de varianza constituye una técnica esencial en la estadística inferencial, utilizada para evaluar la significancia de los efectos en un diseño experimental. Este procedimiento permite identificar las variables individuales o sus interacciones que tienen un impacto relevante dentro del conjunto de condiciones examinadas (Montgomery, 2004). La tabla 6.4 muestra los factores principales (X_1 , X_2 y X_3) representan variables independientes que afectan directamente el resultado del experimento, mientras que las interacciones de segundo y tercer orden (por ejemplo, X_1X_2 , X_1X_3 y $X_1X_2X_3$) analizan cómo las combinaciones de estos factores influyen en el modelo. Cada fuente de variación se descompone en los siguientes componentes estadísticos:

- Suma de Cuadrados (SS): Representa la variabilidad asociada a cada factor o interacción en relación con la variabilidad total del sistema.

- Grados de Libertad (GL): Indican la cantidad de información disponible para estimar la variabilidad de cada fuente.
- Media de Cuadrados (MS): Calculada dividiendo la suma de cuadrados entre sus grados de libertad, proporcionando una estimación de la variabilidad promedio asociada a cada fuente.
- Valor F_0 : Determina la relación entre la variabilidad explicada por el factor (MS) y la variabilidad del error (MSE). Un valor F_0 mayor al valor crítico (F_{tabla}) indica que el efecto del factor o interacción es estadísticamente significativo.

El error captura la variabilidad no explicada por el modelo, mientras que la curvatura evalúa si existe una relación no lineal en los datos experimentales.

Tabla 6.4

Desglose de suma de cuadrados, grados de libertad y estadísticos F para factores e interacciones

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F_0
X_1 – Factor Principal	SS_{X1}	1	MS_{X1}	$F_0 = \frac{MS_{X1}}{MS_E}$
X_2 – Factor Principal	SS_{X2}	1	MS_{X2}	$F_0 = \frac{MS_{X2}}{MS_E}$
X_3 – Factor Principal	SS_{X3}	1	MS_{X3}	$F_0 = \frac{MS_{X3}}{MS_E}$
X_1X_2 – Interaccion Segundo orden	SS_{X1X2}	1	MS_{X1X2}	$F_0 = \frac{MS_{X1X2}}{MS_E}$
X_1X_3 – Interaccion Segundo orden	SS_{X1X3}	1	MS_{X1X3}	$F_0 = \frac{MS_{X1X3}}{MS_E}$
X_2X_3 – Interaccion Segundo orden	SS_{X2X3}	1	MS_{X2X3}	$F_0 = \frac{MS_{X2X3}}{MS_E}$
$X_1X_2X_3$ – Interaccion Tercer orden	SS_{X1X2X3}	1	MS_{X1X2X3}	$F_0 = \frac{MS_{X1X2X3}}{MS_E}$
Curvatura	SS_C	1	MS_C	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
Error	SS_E	2	MS_E	–
Total	SS_T	10	–	–

Nota. Tomado de (Montgomery, 2004). *Diseño y análisis de experimentos* (6ª ed.). John Wiley & Sons. La tabla muestra el desglose del análisis de varianza, incluyendo cómo se calculan los valores de F_0 para cada fuente de variación.

F_0 representa el valor de la prueba F para cada fuente de variación, el cual se compara con el valor crítico de F al nivel de significancia $\alpha=0.05$.

Prosiguiendo con el análisis, se describen los términos de la Tabla 6.5, que incluyen la suma y la media de cuadrados, necesarios para determinar el valor de F_0 asociado a cada factor.

Tabla 6.5

Resultados del ANOVA: suma de cuadrados, grados de libertad, y significancia de factores e interacciones

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	F_0	$F_{Tabla}(0.05, 1, 2)$	Significancia
X1	18.9420	1	18.9420	136.63	18.513	Significativo
X2	0.1035	1	0.1035	0.75	18.513	No significativo
X3	51.4605	1	51.4605	371.20	18.513	Significativo
X1X2	0.0231	1	0.0231	0.17	18.513	No significativo
X1X3	2.6565	1	2.6565	19.16	18.513	Significativo
X2X3	0.4753	1	0.4753	3.43	18.513	No significativo
X1X2X3	0.0946	1	0.0946	0.68	18.513	No significativo
Curvatura	1.5410	1	1.5410	11.12	18.513	No significativo
Error	0.2773	2	0.1386	—	—	—
Total	75.5739	10	—	—	—	—

Nota. Los factores X₁, X₃ y la interacción X₁X₃ fueron significativos ($F_0 > F_{tabla}$), indicando su influencia en la respuesta del modelo. Los demás factores e interacciones no mostraron significancia estadística al nivel de confianza del 95 %.

Para que una variable o interacción sea considerada significativa, debe cumplirse la siguiente condición.

$$F_0 > F(\alpha, f_{numerador}, f_{Denominador}) \quad (26)$$

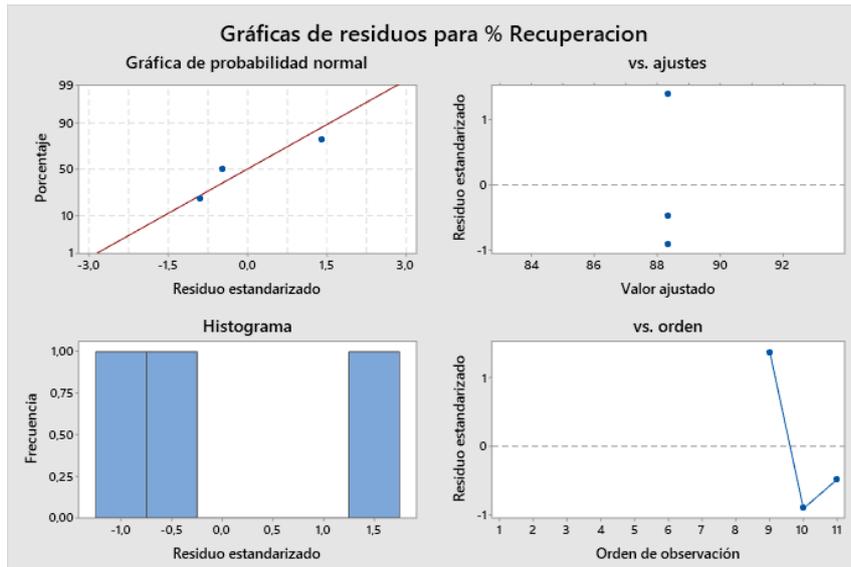
Para que una variable o interacción sea significativa, debe cumplirse la condición $F_0 > F(\alpha, f_{numerador}, f_{Denominador})$, donde $F(\alpha, f_{numerador}, f_{Denominador})$, representa el valor crítico de F correspondiente a un nivel de confianza de 95% y un valor de α de 0.05.

En este análisis, solo los valores de F_0 para los factores X_1 y X_2 superan el valor de F de tabla, indicando que estos factores tienen una significancia mayor en el proceso.

6.4 Evaluación de los residuos

Figura 6.7

Exploración gráfica de residuos: Claves para el porcentaje de recuperación



Nota. Fuente propia con software Minitab 19.

La gráfica de probabilidad normal muestra que los residuos siguen una distribución aproximadamente normal, con pequeñas desviaciones en los extremos. En la gráfica de residuos vs. valores ajustados, los puntos están distribuidos aleatoriamente alrededor de cero, indicando homogeneidad de varianzas y que la relación entre factores y respuesta está correctamente especificada. El histograma refuerza la normalidad de los residuos con una distribución simétrica sin valores extremos. Finalmente, la gráfica de residuos vs. orden de observación confirma la independencia entre observaciones, aunque se nota un residuo ligeramente más alejado en la última observación, sin ser extremo. Estas evidencias respaldan la confiabilidad del modelo ajustado.

6.5 Modelo de regresión en unidades no codificadas

Se presenta un modelo de regresión en unidades no codificadas desarrollado para describir y predecir el porcentaje de recuperación de cobre en el proceso de flotación del mineral sulfurado del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac. El modelo incorpora los efectos principales de los factores **Z-6**, **A-404**, y **% -200M**, junto con sus interacciones de primer, segundo y tercer orden.

Basado en un diseño experimental, el modelo evidencia que **Z-6** y **% -200M** tienen una influencia positiva y significativa en la recuperación, mientras que las interacciones presentan efectos menores. Esta herramienta permite optimizar los parámetros operativos, maximizando la recuperación de cobre y mejorando la eficiencia del proceso de flotación.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas o natural

$$\begin{aligned} \% \text{ Recuperación} = & 26.1 + 1.236 \text{ Z-6} + 0.406 \text{ A-404} + 1.059 \% \text{ -200M} - 0.0087 \text{ Z-} \\ & 6 * \text{A-404} - 0.0197 \text{ Z-6} * \% \text{ -200M} - 0.00872 \text{ A-404} * \% \text{ -200M} \\ & + 0.000186 \text{ Z-6} * \text{A-404} * \% \text{ -200M} + 0.840 \text{ Pt Ctrial} \end{aligned}$$

Donde:

Z₁: Dosificación Z-6 (g/Tn)

Z₂: Dosificación A-404 (g/Tn)

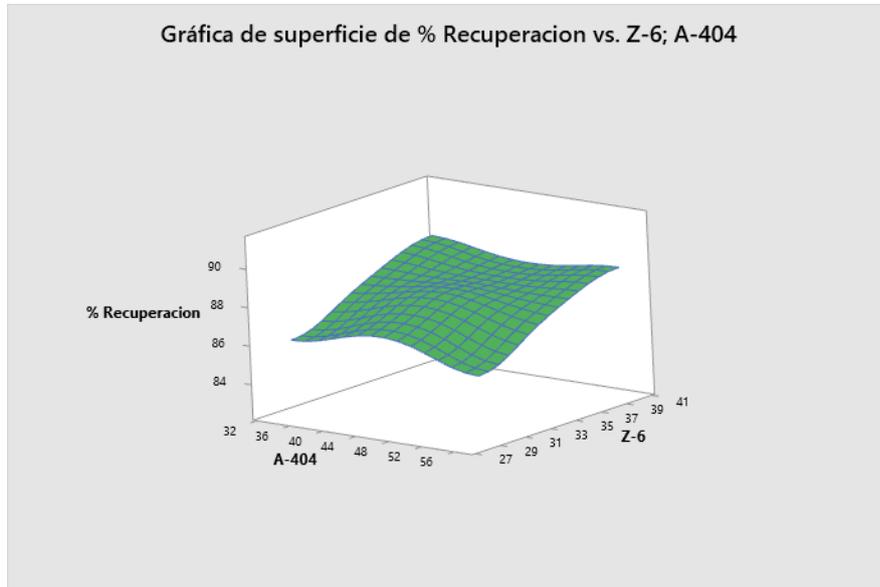
Z₃: Granulometría % pasante -200M (%)

$$\begin{aligned} \% \text{ Recuperación} = & 26.1 + 1.236 * Z_1 + 0.406 * Z_2 + 1.059 * Z_3 - 0.0087 * Z_1 * Z_2 - 0.0197 * Z_1 * Z_3 \\ & - 0.00872 * Z_2 * Z_3 + 0.000186 * Z_1 * Z_2 * Z_3 + 0.840 \text{ Pt Ctrial} \end{aligned}$$

- **Grafica de superficie y contorno % Recuperación vs. Z - 6; A - 404**

Figura 6.8

Gráfica de superficie de % recuperación vs. Z-6; A-404



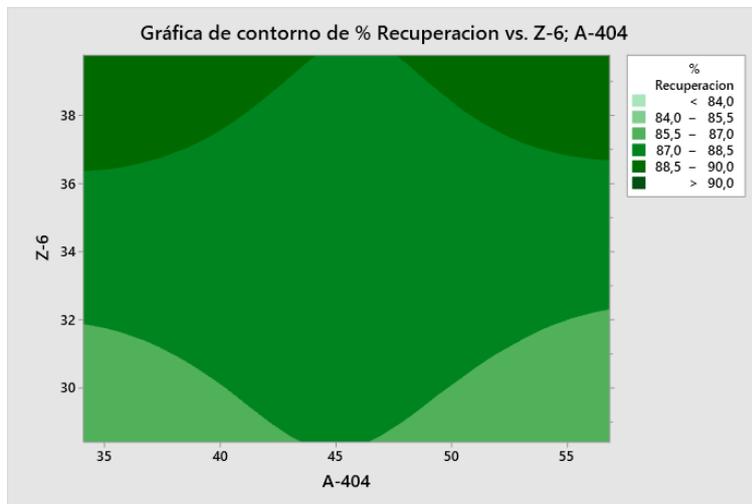
Nota. Fuente propia con software Minitab 19.

La gráfica de superficie muestra que el porcentaje de recuperación de cobre (%) varía en función de los factores **Z-6** y **A-404**. Los niveles de **Z-6** oscilan entre 27 y 41, mientras que los de **A-404** están entre 32 y 56. La recuperación máxima, cercana al 90%, se alcanza cuando **Z-6** está en niveles altos (>37) y **A-404** también está en niveles altos (>50). Por el contrario, los niveles bajos de ambos factores ($Z-6 < 30$ y $A-404 < 35$) conducen a valores de recuperación menores, cercanos al 85%.

La gráfica también sugiere una interacción moderada entre los factores. Aumentar **Z-6** tiene un efecto más pronunciado en la recuperación que aumentar **A-404**, aunque ambos contribuyen positivamente. La superficie indica que el ajuste óptimo implica mantener **Z-6** en niveles altos y **A-404** en niveles intermedios-altos para maximizar la recuperación. Estos resultados refuerzan la necesidad de optimizar cuidadosamente las proporciones de los reactivos para obtener un rendimiento óptimo en el proceso de flotación.

Figura 6.9

Gráfica de contorno de % recuperación vs. Z-6; A-404



Nota. Fuente propia con software Minitab 19.

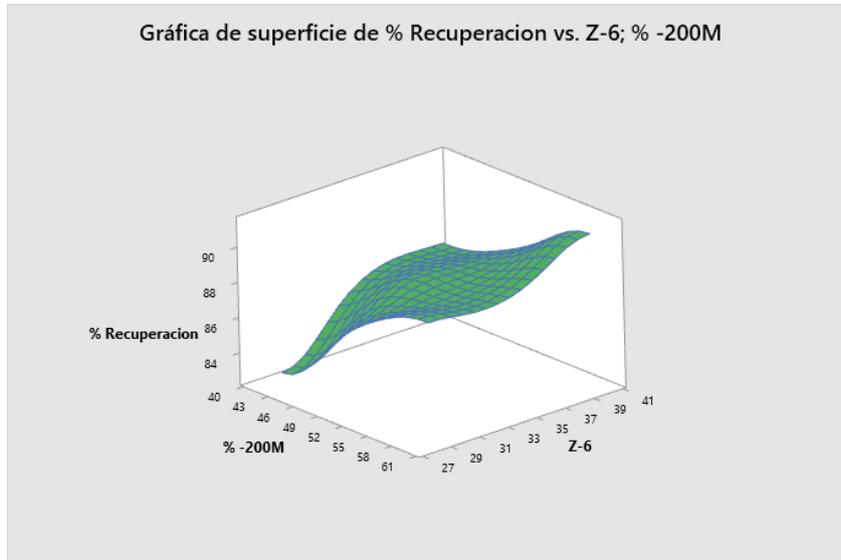
La gráfica de contorno muestra que los valores más altos de recuperación de cobre (>90%) se alcanzan cuando **Z-6** está en niveles altos (>37) y **A-404** en niveles intermedios-altos (45–55). En contraste, los valores más bajos (84.0%–85.5%) ocurren cuando ambos factores están en niveles bajos. Los colores en la gráfica refuerzan esta relación, con tonos más claros indicando mayor recuperación y tonos oscuros representando zonas menos eficientes.

La interacción entre **Z-6** y **A-404** es evidente, ya que ambos factores trabajan juntos para maximizar la recuperación. Los resultados sugieren que mantener niveles altos de **Z-6** y ajustar **A-404** en un rango óptimo es crucial para lograr una flotación eficiente. Esto confirma la necesidad de un ajuste cuidadoso de ambos factores para optimizar el proceso.

- **Grafica de superficie y contorno % recuperación vs. z - 6; granulometría**

Figura 6.10

Gráfica de superficie de % recuperación vs. Z-6; granulometría



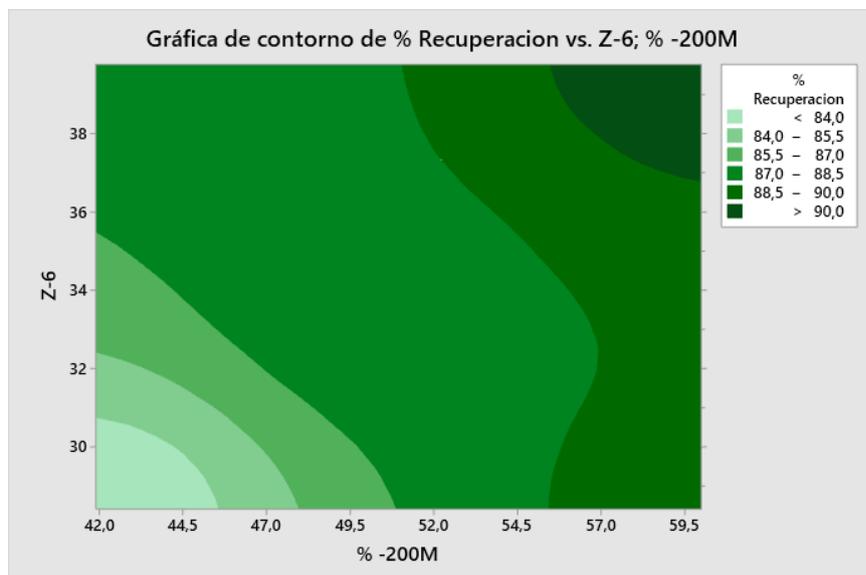
Nota: Fuente propia con software Minitab 19.

La gráfica de superficie revela que los factores **Z-6** y **% -200M** tienen un impacto significativo y combinado en la recuperación de cobre. La recuperación más alta (>90%) se logra cuando **Z-6** está en niveles altos (>37) y el **% -200M** también se encuentra elevado (>58%), lo que indica una interacción importante entre estos factores. Por otro lado, cuando cualquiera de los dos factores está en niveles bajos ($Z-6 < 30$ o $\% -200M < 52$), la recuperación disminuye notablemente (<85%), incluso si el otro factor está en un nivel alto.

Este comportamiento muestra que ambos factores trabajan conjuntamente para maximizar la eficiencia del proceso de flotación. El efecto positivo de **Z-6** es más pronunciado cuando se combina con una granulometría adecuada ($\% -200M$), que permite una mejor liberación del material valioso. Por lo tanto, optimizar simultáneamente los niveles de ambos factores es esencial para alcanzar los máximos niveles de recuperación de cobre.

Figura 6.11

Gráfica de contorno de % recuperación vs. Z-6; granulometría



Nota. Fuente propia con software Minitab 19.

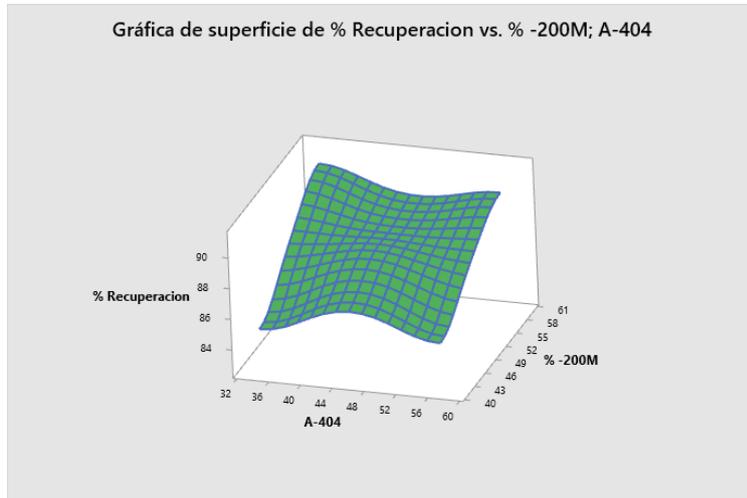
La gráfica de contorno muestra cómo los factores **Z-6** y **% -200M** influyen conjuntamente en el porcentaje de recuperación de cobre (%). Los tonos más claros (>90%) indican las zonas donde la recuperación es máxima, lograda cuando **Z-6** está en niveles altos (>37) y el **% -200M** está por encima de 57%. En contraste, los tonos más oscuros (84%–85.5%) representan zonas de menor recuperación, que se observan en niveles bajos de ambos factores, como **Z-6** alrededor de 34 y **% -200M** por debajo de 47%.

Este patrón sugiere que la interacción entre los factores es clave para optimizar la recuperación. Aunque el **% -200M** tiene un efecto significativo, su impacto se amplifica con niveles altos de **Z-6**, mostrando que ambos factores deben ajustarse conjuntamente para maximizar la eficiencia del proceso de flotación. Esta combinación asegura una liberación eficiente del material valioso y mejora la efectividad del reactivo en el proceso.

- **Grafica de superficie y contorno % recuperación vs. granulometría; A - 404**

Figura 6.12

Gráfica de superficie de % recuperación vs. granulometría; A-404



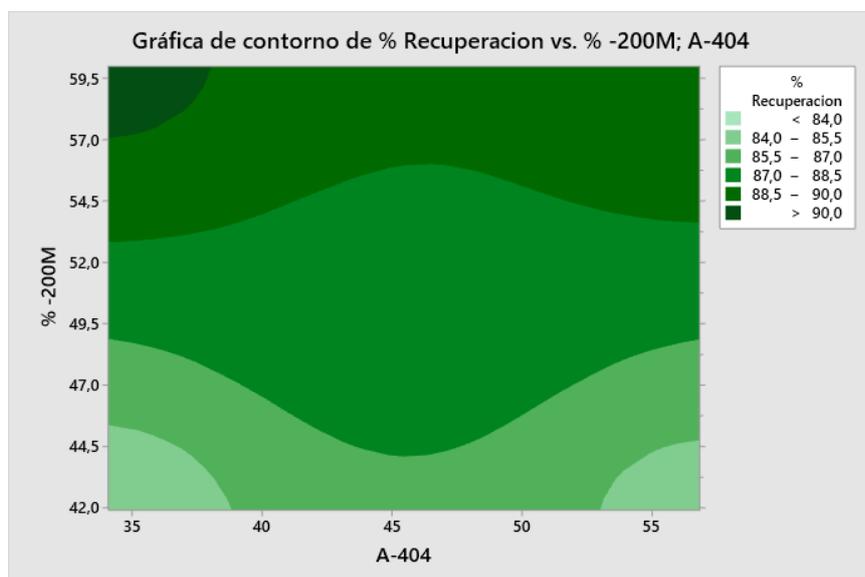
Nota. Fuente propia con software Minitab 19.

La gráfica de superficie muestra cómo los factores **% -200M** y **A-404** afectan conjuntamente el porcentaje de recuperación de cobre (%). Se observa que los valores máximos de recuperación (>90%) se alcanzan cuando el **% -200M** está en niveles altos (>58%), mientras que el efecto de **A-404** es menos marcado, con una contribución óptima en niveles intermedios-altos (45–55). Por el contrario, los valores mínimos de recuperación (<85%) ocurren cuando **% -200M** está en niveles bajos (<50%), independientemente del nivel de **A-404**.

Esto sugiere que el **% -200M** tiene una influencia predominante en la recuperación, lo cual se relaciona con la importancia de la granulometría para la liberación del material valioso. Aunque el efecto de **A-404** es menor, su ajuste en niveles intermedios contribuye a estabilizar la recuperación. La interacción entre ambos factores no es altamente pronunciada, pero su combinación en niveles adecuados asegura un rendimiento eficiente en el proceso de flotación.

Figura 6.13

Gráfica de contorno de % recuperación vs. granulometría; A-404



Nota. Fuente propia con software Minitab 19.

La gráfica de contorno muestra cómo los factores **% -200M** y **A-404** influyen en el porcentaje de recuperación de cobre (%). Los tonos más claros (>90%) representan las áreas de mayor recuperación, alcanzadas cuando el **% -200M** está en niveles altos (>58%), mientras que el **A-404** tiene su mejor efecto en niveles intermedios (45–50). Los tonos oscuros (84.0%–85.5%) están asociados con niveles bajos de **% -200M** (<50%), independientemente del nivel de **A-404**.

Esto indica que el **% -200M** es el factor predominante en la recuperación, relacionado con una liberación más efectiva del mineral valioso en granulometrías finas. Aunque el efecto de **A-404** es menos significativo, mantenerlo en niveles intermedios contribuye a estabilizar la recuperación. La interacción entre ambos factores es moderada, y su combinación adecuada garantiza un rendimiento óptimo en el proceso de flotación.

CONCLUSIONES

- Durante el proceso de flotación, se logró una recuperación máxima de cobre del 91.20%, alcanzada en la prueba número 6.
- Las dosificaciones más efectivas del reactivo Z-6 fueron 39.77 y 34.09 g/tn. Con la primera, se obtuvo la máxima recuperación de 91.20%, mientras que con la segunda dosificación se lograron tres recuperaciones del 90%, lo que demuestra su consistencia en resultados cercanos al óptimo.
- Por otro lado, para el reactivo A-404, las dosificaciones más adecuadas fueron 34.09 y 45.46 g/tn. Con la dosificación de 34.09 g/tn se alcanzó la recuperación máxima de 91.20%, mientras que con 45.46 g/tn se obtuvieron tres recuperaciones del 90%. Esto sugiere que ambos valores son efectivos dentro del rango evaluado.
- Asimismo, se identificaron las granulometrías óptimas para el proceso, siendo estas de 59.99 y 50.95 % -200M. La granulometría de 59.99 % -200M permitió lograr la máxima recuperación de 91.20%, mientras que la de 50.95 % -200M resultó en tres recuperaciones del 90%, confirmando su importancia en la eficiencia del proceso de flotación.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar otros reactivos a fin para obtener información sobre la flotabilidad del mineral del yacimiento “Calvario”.
- Se recomienda llevar a cabo pruebas en condiciones a escala planta piloto para confirmar que las dosificaciones y granulometrías identificadas son igualmente efectivas fuera del entorno experimental.
- Se recomienda no diluir la concentración del espumante por la pérdida de eficacia en cuanto a la generación de espumas.
- Se recomienda utilizar la presente información como base para futuras pruebas con el mineral mencionado.

Referencia bibliográfica

- Abarca Rodriguez, J. J. (2011). *Flotación de minerales*. Huacho - Lima.
- Astucuri Tinoco, V. (1994). *Introducción a la flotación de minerales*. Lima: Universidad de lima.
- Azañero Ortiz, A. (2015). *Flotación y concentración de minerales* (1ra edición ed.). Lima: colecciones Jovic.
- Bravo Galvez, A. C. (2004). *Manual de flotación*. Casapalca.
- chemicals, O. m. (2009). *Flotation Guidebook*. Australia.
- Crozier, R. (1992). *Flotation: theory, reagents and ore testing*. (Oxford, Ed.) Pergamon press.
- Cytec. (2002). *Mining Chemicals handbook*. Baulkham Hills, Australia.
- Domic Mihovilovic, E. M., Sánchez, M., & Correa C., H. (2006). *Manual general de minería y metalurgia*. Vitacura, Chile: Portal minero ediciones.
- Feijoo, G. (2023). Flotación fundamentos y casos prácticos. *Colección "Notas en Enseñaría Química"*, 20. Obtenido de University of Santiago de Compostela.
- Garcia Zuñiga, H. (1935). La recuperación por flotación es una función exponencial del tiempo. *Boletín minero* (418), 83-86.
- Gaudin, A. M. (1922). *Flotation*. new york and london: McGrawHill.
- Greet, C. J. (2010). *Flotation plant optimisation*. Carlton Victoria: spectrum.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y analisis de experimentos*. Mexico: LIMUSA WILEY.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodologia de la investigacion*. Mexico: McGrawHill.
- Sutulov, A. (1963). *Flotacion de minerales*. Concepcion - Chile.
- Tafur Portilla, R. (2012). *La tesis universitaria*. Lima: Editorial Mantaro.

ANEXOS

ANEXO “A”

MATRIZ DE CONSISTENCIA

RECUPERACION DE COBRE POR EL PROCESO DE FLOTACION A PARTIR DE MINERAL SULFURADO DE COBRE DEL YACIMIENTO CALVARIO, COTABAMBAS, APURIMAC				
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
Problema general: ¿Cómo alcanzar una máxima recuperación de cobre mediante el proceso de flotación del mineral procedente del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac?	Objetivo General: Llegar a la máxima recuperación de cobre mediante el proceso de flotación del mineral sulfurado del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac.	Hipótesis General: Mediante el proceso de flotación se obtiene una máxima recuperación de cobre del mineral sulfurado del yacimiento Calvario, Cotabambas, Apurímac	DEPENDIENTE	Tipo de investigación Tecnológico de manera que se aplica conocimientos teóricos y empíricos para la solución del problema.
			<ul style="list-style-type: none"> ● Recuperación de Cu (%) 	
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	INDEPENDIENTE	Nivel de investigación Descriptivo y Correlacional
PE 1: ¿Cómo influye la dosificación del reactivo Z-6 como colector primario en la flotación para la recuperación de cobre en minerales sulfurados de cobre?	OE 1: Controlar la dosificación correcta del reactivo Z-6 para la flotación del mineral sulfurado de cobre.	H 1: El control de la dosificación del reactivo Z-6 permite una máxima recuperación de cobre en el proceso de flotación del mineral sulfurado de cobre.	<ul style="list-style-type: none"> ● Dosificación Z-6 (g/t) ● Dosificación A-404 (g/t) ● Granulometría (µm) 	Población Yacimiento Calvario
PE 2: ¿Cómo influye la dosificación del reactivo A-404 como colector secundario en la flotación para la recuperación de cobre en minerales sulfurados de cobre?	OE 2: Controlar la dosificación adecuada del reactivo A-404 para la flotación del mineral sulfurado de cobre.	H 2: El control de la dosificación del reactivo A-404 permite una máxima recuperación de cobre en el proceso de flotación del mineral sulfurado de cobre.		Tamaño de muestra 60 kg de mineral del yacimiento “Calvario”
PE 3: ¿Afectará la granulometría del mineral para permitir una liberación adecuada del mineral para el proceso de flotación de mineral sulfurado de cobre?	OE 3: Obtener el tamaño de partícula adecuado para el proceso de flotación del mineral sulfurado de cobre.	H 3: Obtener la granulometría adecuada del mineral permite una óptima liberación del mineral valioso mejorando la recuperación de cobre en la flotación.		Diseño de investigación Experimental factorial 2 ^k
				Se manipula variables independientes donde tendrá consecuencias en la variable dependiente. (causa-efecto).

ANEXO “B” OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES / RANGO	INDICADOR	UNIDAD	INSTRUMENTO Y/O TECNICA DE MEDICION
Variable Dependiente	Recuperación de Cu	Relación entre la masa del material útil alcanzado en el concentrado y la masa del material útil en la alimentación. (Azañero Ortiz, 2015)	Relacionar la cantidad de cobre obtenido en el concentrado con el cobre en el mineral de cabeza	Porcentaje de recuperación de cobre. /85 – 92	Ley de cobre en el concentrado	Porcentaje (%)	Balace metalúrgico y análisis químico.
Variable Independiente	Dosificación Z-6	Xantato amílico de potasio utilizado en la flotación de minerales sulfurados para una recuperación valiosa de cobre. (Cytec, 2002).	Agregar el Z-6 por tonelada de mineral tratado, ajustado según las condiciones de flotación y la calidad del mineral.	Concentración del reactivo Z-6 en la pulpa. /10 – 50	Cantidad del reactivo Z-6 en la pulpa.	g/t (gramos por tonelada)	Balanza de precisión digital gramera y micropipetas.
	Dosificación A-404	Aeropromotor 404 utilizado en la flotación de minerales sulfurados para una recuperación valiosa de cobre. (Cytec, 2002)	Agregar el A-404 por tonelada de mineral tratado, ajustado según las condiciones de flotación y la calidad del mineral.	Concentración del reactivo A-404 en la pulpa. /10 – 50	Cantidad del reactivo A-404 en la pulpa.	g/t (gramos por tonelada)	Balanza de precisión digital gramera y micropipetas.
	Granulometría	Distribución de tamaños de partículas en una muestra de mineral. (Astucuri Tinoco, 1994).	Medir el tamaño de partículas presentes en el producto de la molienda del mineral.	Tamaño de mineral retenido /74 – 400	Diferencia de tamaño de partículas	µm (micrones)	Análisis de malla con tamices.

ANEXO “C”

Documentación de Procedimientos y Resultados de Laboratorio

ANEXO C1


REPORTE DE LEYES
CLIENTES
INFORME DE ENSAYO N° PBL-CL18020014

Ciente	AUGUSTO HUALLPAYUNCA QUISPE (961350219)
N° de Orden	PBL-CL18020014
Procedencia	Cotabambas
Fecha de Recepcion	17/02/2024
Fecha de Reporte	18/02/2024
Tipo de Muestras	Mineral de Exploracion
Características y Condiciones	Muestras codificadas por el cliente
Determinacion de Muestras	Microscopia óptica y de barrido electrónico
Referencia Cliente	Mineral Sulfurado
Cantidad de muestra	5kg

TIPO DE MINERAL	%
BORNITA	30
COVELINA	11
CALCOPIRITA	25
PIRITA	24
OTROS	10
Ley de Cabeza	5.74
Porcentaje de Humedad	1.35
Gravedad Especifica	2.78 a 2.84

YOEL BAUTISTA SOTOMAYOR
JEFE DE GUARDIA

(+51) 936 137 051

Planta de beneficio Lambraspampas

NOTA: Los resultados presentados corresponden solo a la muestra indicada

ELEMENTO METODO

Au, Ag Fire Assay / Gravimétrico

Cu, Cuscac Vía Clásica / Volumétrica

UNIDADES

Oz/Tc Onza por Tonelada Corta

% Porcentaje

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de J.E. AL ENTERPRISES INC S.A.C. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los contrastes de validez tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, siempre que de los rechos gúese antes de 1 mes. Pasado a dicho lapso, serán desechados.
Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de J.E. AL ENTERPRISES INC S.A.C.

ANEXO C2



INFORME DE ENSAYO N° PBL-CL24020016

Cliente: Augusto Huallpayunca Quispe (929863124)
 N° de Orden: PBL-CL24020016
 Procedencia: Cusco
 Fecha de Recepción de Muestras: 23/02//2024
 Fecha de Reporte de Resultados: 23/02/2024
 Tipo de Muestra: Mineral de Fe
 Características y Condiciones: Muestras Codificadas por el cliente
 Determinaciones de Análisis: Cu, Cusac, Fe

Item	Código del Cliente	Código de Laboratorio	Elemento	Cu	Cusac	Fe
			Unidad de Medida	%	%	%
			Límite Inferior	0.02	0.02	0.10
			Límite Superior	50	50	100
1	CBZ – M1	CL-020024		5.80	0.02	15.40

ELEMENTO **METODO**
 Au, Ag : Fire Assay / Gravimetría
 Cu, Pb, Zn : Vía Clásica / Volumetría
UNIDADES
 Cu/Tc : Onza por Tonelada Corta
 % : Porcentaje

Neuman Ruiz Paredes

JEFE DE GUARDIA

(+51) 993983129

Planta de Beneficio Lambresampas

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de JEAL ENTERPRISES INC. SAC. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, mientras que de los rechazo gruesos será de 1 mes. Posterior a dicho lapso, serán desechados.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de JEAL ENTERPRISES INC. SAC.

ANEXO C3


REPORTE DE LEYES
CLIENTES
INFORME DE ENSAYO N° PBL-CL24030009

Cliente AUGUSTO HUALLPAYUNCA QUISPE (929663124)
 N° de Orden PBL-CL24030009
 Procedencia Cotabambas
 Fecha de Recepcion 7/03/2024
 Fecha de Reporte 7/03/2024
 Tipo de Muestras Mineral de Exploracion
 Caracteristicas y Condiciones Muestras codificadas por el cliente
 Determinacion de Muestras Cu

Ítem	Código del Cliente	Código de Laboratorio	Elemento	Cu
			Unidad de Medida	%
			Limite Inferior	0.02
			Limite Superior	50
1	M-1 CC	CL-030021		20.15
2	M-1 RLV	CL-030022		1.26
3	M-2 CC	CL-030023		20.80
4	M-2 RLV	CL-030024		0.95
5	M-3 CC	CL-030025		19.87
6	M-3 RLV	CL-030026		1.24
7	M-4 CC	CL-030027		19.44
8	M-4 RLV	CL-030028		0.96
9	M-5 CC	CL-030029		19.8
10	M-5 RLV	CL-030030		0.78
11	M-6 CC	CL-030031		21.14
12	M-6 RLV	CL-030032		0.65

YOEL BAUTISTA SOTOMAYOR
JEFE DE GUARDIA

(+51) 936 137 051

Planta de beneficio Lambraspampas

ELEMENTO METODO

Au, Ag Fire Assay / Gravimetrico

Cu, Cusac Via Clasica / Volumetrica

UNIDADES

Oz/Tc Onza por Tonelada Corta

% Porcentaje

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de JEAL ENTERPRISES INC. SAC. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recolección, mientras que de los rechazos gruesos será de 1 mes. Posterior a dicho lapso, serán desechados.

Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de JEAL ENTERPRISES INC. SAC.

ANEXO C4


REPORTE DE LEYES
CLIENTES
INFORME DE ENSAYO N° PBL-CL24050049

Cliente	AUGUSTO HUALLPAYUNCA QUISPE (929663124)
N° de Orden	PBL-CL24030009
Procedencia	Cotabambas
Fecha de Recepcion	21/05/2024
Fecha de Reporte	22/05/2024
Tipo de Muestras	Mineral de Exploracion
Características y Condiciones	Muestras codificadas por el cliente
Determinacion de Muestras	Cu

Ítem	Código del Cliente	Código de Laboratorio	Elemento	Cu
			Unidad de Medida	%
			Límite Inferior	0.02
			Límite Superior	50
1	M-7 CC	CL-050093		20.12
2	M-7 RLV	CL-050094		0.85
3	M-8 CC	CL-050095		18.47
4	M-8 RLV	CL-050096		0.71
5	M-9 CC	CL-050097		18.49
6	M-9 RLV	CL-050098		0.86
7	M- 10 CC	CL-050099		18.01
8	M-10 RLV	CL-050100		0.92
9	M-11 CC	CL-050101		18.57
10	M-11 RLV	CL-050102		0.9

YOEL BAUTISTA SOTOMAYOR
JEFE DE GUARDIA
(+51) 936 137 051
Planta de beneficio Lambraspampas

ELEMENTO	METODO
Au, Ag	Fire Assay / Gravimetrico
Cu, Cusac	Via Clasica / Volumetrica
UNIDADES	
Oz/Tc	Ozta por Tonelada Corta
%	Porcentaje

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de JEAL ENTERPRISES INC. S.A.C. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, mientras que de los rechazos quince días de 1 mes. Posterior a dicho lapso, serán desechadas.
 Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de JEAL ENTERPRISES INC. S.A.C.

ANEXO C5


REPORTE DE LEYES
CLIENTES
INFORME DE ENSAYO N° PBL-CL24050103

Cliente	AUGUSTO HUALLPAYUNCA QUISPE (929663124)
N° de Orden	PBL-CL24030009
Procedencia	Cotabambas
Fecha de Recepcion	21/05/2024
Fecha de Reporte	22/05/2024
Tipo de Muestras	Mineral de Exploracion
Características y Condiciones	Muestras codificadas por el cliente
Determinacion de Muestras	Cu

Ítem	Código del Cliente	Código de Laboratorio	Elemento	Cu
			Unidad de Medida	%
			Limite Inferior	0.02
			Limite Superior	50
1	CONCENTRADO1	CL-0500103		16.75
2	CONCENTRADO 2	CL-0500104		12.42
3	CONCENTRADO 3	CL-0500105		8.43
4	CONCENTRADO 4	CL-0500106		8.01

YOEL BAUTISTA SOTOMAYOR
JEFE DE GUARDIA

(+51) 936 137 051

Planta de beneficio Lambraspampas

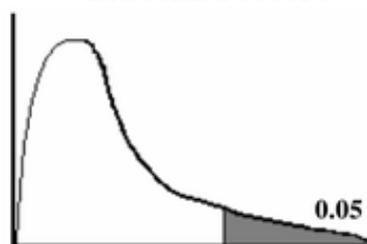
ELEMENTO	METODO
Au, Ag	Fire Assay / Gravimetrico
Cu, Cusac	Via Clasica / Volumetrica
UNIDADES	
Oz/Tc	Onza por Tonelada Corta
%	Porcentaje

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de JEAL ENTERPRISES INC. SAC. Los resultados de los ensayos pertenecen sólo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Las contramuestras de pulpa tendrán un tiempo de permanencia de hasta 3 meses desde su recepción, mientras que de los rechazos gruesos será de 1 mes. Posterior a dicho lapso, serán desechados.
 Este Informe de Ensayo no podrá ser reproducido, excepto en su totalidad, sin la autorización escrita de JEAL ENTERPRISES INC. SAC.

ANEXO “D”

Tabla de Fisher

DISTRIBUCION F



		Grados de libertad del numerador											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	
Grados de libertad del denominador	1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	
	2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396	19.413	
	3	10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	
	4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	
	5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	
	6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	
	7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	
	8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2839	
	9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	
	10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	
	11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	
	12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	
	13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	
	14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.5342	
	15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	
	16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.4247	
	17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3807	
	18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.3421	
	19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.3080	
	20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2776	
	21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660	2.3210	2.2504	
	22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419	2.2967	2.2258	
	23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201	2.2747	2.2036	
	24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002	2.2547	2.1834	
	25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.1649	
	26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655	2.2197	2.1479	
	27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501	2.2043	2.1323	
	28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360	2.1900	2.1179	
	29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229	2.1768	2.1045	
	30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0921	
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0772	2.0035		
50	4.0343	3.1826	2.7900	2.5572	2.4004	2.2864	2.1992	2.1299	2.0734	2.0261	1.9515		
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401	1.9926	1.9174		
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588	1.9105	1.8337		
∞	3.8841	3.0369	2.6456	2.4127	2.2551	2.1400	2.0514	1.9807	1.9226	1.8739	1.7964		

ANEXO “E”

Tabla de distribución T Student

n	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.158	0.325	0.510	0.727	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.142	0.289	0.445	0.617	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.137	0.277	0.424	0.584	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	0.134	0.271	0.414	0.569	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.132	0.267	0.408	0.559	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.131	0.265	0.404	0.553	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.130	0.263	0.402	0.549	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	0.130	0.262	0.399	0.546	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.129	0.261	0.398	0.543	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.129	0.260	0.397	0.542	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.129	0.260	0.396	0.540	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.128	0.259	0.395	0.539	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.128	0.259	0.394	0.538	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.128	0.258	0.393	0.537	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.128	0.258	0.393	0.536	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.128	0.258	0.392	0.535	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.128	0.257	0.392	0.534	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.127	0.257	0.392	0.534	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.127	0.257	0.391	0.533	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.127	0.257	0.391	0.533	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.127	0.257	0.391	0.532	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.127	0.256	0.390	0.532	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.127	0.256	0.390	0.532	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.127	0.256	0.390	0.531	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.127	0.256	0.390	0.531	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.127	0.256	0.390	0.531	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.127	0.256	0.389	0.531	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.126	0.255	0.388	0.529	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.126	0.254	0.387	0.527	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.126	0.254	0.386	0.526	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	0.126	0.253	0.385	0.524	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

ANEXO “F”**YACIMIENTO DE COBRE “CALVARIO “**

ANEXO "G"

PRUEBAS DE FLOTACIÓN EN LABORATORIO METALÚRGICO – FOTOGRAFÍAS

