

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



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE-PLOMO POR
FLOTACION SELECTIVA EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA-
CHUMBIVILCAS. CUSCO**

PRESENTADA POR:

BR. CONDORI SENCIA, SUYEN

BR. CRUZ SALCEDO, CONTY YONDINY

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

ASESOR:

ING. CARRASCO TAPIA, PORFIRIO

CUSCO – PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:.....

OPTIMIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE-PLOMO
POR FLOTACIÓN SELECTIVA EN LA UNIDAD MINERA
CONSTANCIA - CHUMBIVILCAS, CUSCO

presentado por: SILVÉN CONDORI SENCIA con DNI Nro.: 74423903 presentado
por: CONTY YONDINY CRUZ SACEDO con DNI Nro.: 74492982 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 9 %.

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.	<u>X</u>
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**
la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 25 de MAYO de 2025



Firma

Post firma

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: 462194373

Surge Condori S y Conty Y. Cru

Optimización de la recuperación de cobre- plomo por flotación selectiva en la unidad minera constanc

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:462194373

Fecha de entrega

25 may 2025, 7:50 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

25 may 2025, 7:58 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

TESIS Optimización de la recuperación de cobre- plomo por flotación selectiva en la unidad mine....pdf

Tamaño de archivo

3.6 MB

164 Páginas

21.532 Palabras

114.012 Caracteres

9% 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 16 words)

Top Sources

- 8%  Internet sources
- 0%  Publications
- 6%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Hidden Text**
8 suspect characters on 4 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.

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO, ESTIMADOS MIEMBROS DEL JURADO CALIFICADOR:

Conforme al Reglamento para Optar el título Profesional de Ingeniero Metalúrgico de nuestra Facultad, nos complace presentar ante ustedes el trabajo de investigación titulado:

" OPTIMIZACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE-PLOMO POR FLOTACION SELECTIVA EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA-CHUMBIVILCAS. CUSCO “

El propósito de esta investigación es analizar y optimizar la separación de cobre y plomo mediante el proceso de flotación en la unidad minera Constancia-Chumbivilcas.

Confiamos en poder satisfacer todas las exigencias requeridas para esta investigación y que este estudio pueda ser de utilidad tanto como material de investigación como apoyo para empresas o personas interesadas en el tema.

Los graduados

DEDICATORIA

A Dios. Gracias por permitirme llegar a esta instancia, por ser el camino del bien y fortalecer mi espíritu día a día. Mi reconocimiento total a mis padres Aurelio Cruz Condori y Valentina Salcedo Quispe, a mis queridos hermanos Sergio, Olinda, Fredy, y Beto a quienes agradezco, por conjeturar en mi fortaleza, por el cimiento que supieron brindarme. A Mishell, por conferirme vigor.

Conty Yondiny Cruz Salcedo

A Dios. A mis padres Faustino Condori Nina y Maximiliana Sencia Huamani por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluyen este. Me instituyeron con reglas y con buenos valores, y me propiciaron constantemente para lograr mis objetivos.

Suyen Condori Sencia

INTRODUCCIÓN

La industria minera desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico de diversos países alrededor del mundo, al proporcionar una amplia gama de minerales esenciales para múltiples sectores industriales. Entre los minerales más relevantes se encuentran el cobre y el plomo, cuya extracción y procesamiento son de suma importancia debido a su extenso uso en distintas aplicaciones industriales y tecnológicas.

El presente trabajo de investigación, titulado como " **Optimización de la Recuperación de Cobre-Plomo por Flotación Selectiva en la unidad minera Constancia-Chumbivilcas. Cusco** " tiene como propósito examinar y mejorar la separación de cobre y plomo a través del proceso de flotación en la unidad minera Constancia-Chumbivilcas. Se llevarán a cabo ensayos y análisis detallados para comprender en mayor profundidad las variables operativas y los reactivos empleados en el proceso de flotación, con el fin de potenciar la recuperación de cobre y optimizar su eficiencia.

Los resultados de este estudio tendrán un impacto significativo en la operación minera, ya que permitirán optimizar los costos del proceso de recuperación de cobre y mejorar su sostenibilidad. Además, se espera que los hallazgos obtenidos puedan ser aplicados en otras operaciones mineras, tanto a nivel nacional como internacional, contribuyendo al avance.

INDICE

PRESENTACIÓN	I
DEDICATORIA	II
INTRODUCCIÓN	III
INDICE	IV
INDICE DE FIGURAS	XI
INDICE DE GRAFICOS	XII
INDICE DE TABLAS	XIII
SIGLAS Y ABREVIATURAS	XVII
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.	Situación Problemática	1
1.2.	Formulación de Problemas	2
1.2.1.	Problema General	2
1.2.2.	Problema Específico	2
1.3.	Justificación	2
1.3.1.	Conveniencia	2
1.3.2.	Relevancia Social	3

1.3.3.	Relevancia Tecnológica	3
1.4.	Objetivos de la Investigación.	4
1.4.1.	Objetivo General.	4
1.4.2.	Objetivo Específico.	4

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de la Investigación	5
2.1.1.	Antecedentes Internacionales.	5
2.1.2.	Antecedentes Nacionales.	6
2.2.	Bases Teóricas.	8
2.2.1.	Flotación de Minerales.	8
2.2.2.	Variables Operacionales en el proceso de Flotación	9
2.2.3.	P80:	11
2.2.4.	Mecanismo y Cinética de la Flotación	14
2.2.4.1.	Mecanismo de la flotación.	14
2.2.4.2.	Interpretación Termodinámica del Fenómeno.	16
2.2.4.2.1.	Comportamiento Hidrofóbico.	17
2.2.4.2.2.	Comportamiento Hidrofílico.	17
2.2.4.2.3.	Interpretación Termodinámica.	17
2.2.4.2.4.	Burbujas de Aire en Flotación.	17

2.2.4.3.	Unión de la Burbuja con la Partícula Mineral.	18
2.2.4.4.	Termodinámica del Mojamiento o de Interfases	19
2.2.4.5.	Angulo de Contacto y ecuación de Young.	20
2.2.4.6.	Cinética de Flotación	21
2.2.4.8.	Reactivos de Flotación	25
2.2.4.8.1.	Colectores	26
2.2.4.9.	Clasificación de los Colectores	27
2.2.4.10.1.	La Cal	30
2.2.4.11.	Espumantes.	30
2.2.4.12.	Separación de Cobre-Plomo.	31
2.2.4.13.	Modificadores depresores.	34
2.2.4.13.1.	Separación usando bicromato de sodio	34
2.2.4.14.	Depresión de plomo.	35
2.2.4.15.	Etapas de Flotación	36
2.2.4.15.1.	Flotación Rougher(Primaria).	36
2.2.4.15.2.	Flotación Cleaner	36
2.2.4.15.3.	Flotación cleaner scavenger	37
2.2.4.16.	Principios de Funcionamiento de las Celdas de Flotación	38

CAPITULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. HIPOTESIS	41
3.1.1. Hipótesis General	41
3.1.2. Hipótesis Específicos	41
3.2. VARIABLES	42
3.2.1. Identificación de Variables	42
3.2.1.1. Variables Dependientes	42
3.2.1.2. Variables Independientes	42
3.3. Indicadores	42
3.4. Operacionalización de Variables.	42

CAPITULO IV: METODOLOGIA

4.1. Tipo de Investigación	44
4.2. Nivel de investigación	44
4.3. Método de investigación	44
4.4. Diseño de investigación	44
4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	45
4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	45
4.7. Población y muestra de estudio.	46
4.8. Materiales e instrumentos de investigación.	46

4.8.1.	Materiales de investigación	46
4.8.2.	Instrumentos y equipos de investigación	46

CAPITULO V: DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1.	Procedimiento Experimental	48
5.2.	Preparación Mecánica de Minerales (Muestreo de mineral)	49
5.2.3.	Chancado Primario y Secundario	49
5.2.4.	Homogenizado y Cuarteo	49
5.3.	Análisis Químico de Cabeza y Caracterización de la Muestra del Mineral.	49
5.3.1.	Caracterización de Mineral de Cabeza.	52
5.4.	Determinación de Gravedad Especifica	52
5.5.	Moliendabilidad	53
5.6.	Distribución Granulométrica	57
5.6.1.	Equipos y Materiales	58
5.6.2.	Procedimiento	58
5.6.3.	Resultados	58
5.7.	Función de Matemática de GATES-GAUDIN-SCHUMANN(G-G-S)	60
5.8.	Desarrollo Experimental de Flotación Bulk	65
5.8.1.	Materiales y Reactivos	65
5.8.1.1.	Materiales	65

5.8.1.2.	Reactivos	66
5.9.	Plantilla de Diseño Experimental	69
5.10.	Preparación de pulpas para la flotación Colectiva de minerales	71
5.11.	Dosificación de Reactivos	72
5.11.1.	Cálculo de Consumo de Reactivo para Prueba de Flotación	73
5.12.	Parámetros de Operación para las Pruebas de Flotación	74
5.13.	Pruebas de Experimentación de Flotación Bulk en laboratorio de Procesamiento de Minerales de E.P. Ingeniería Metalúrgica.	78
5.14.	Balance Metalúrgico de Recuperaciones de Plomo en el Concentrado Bulk	96
5.15.	Pruebas de Flotación Selectiva	101
5.16.	Pruebas de experimentación de flotación selectiva en laboratorio de procesamiento de minerales de E.P. Ingeniería Metalúrgica	102

CAPITULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1.	Diseño de Superficie de Respuesta para el Análisis de Resultados con Minitab	21.116
6.2.	Análisis en las Pruebas Experimentales para la Recuperación de Cobre con Diseño Factorial y Hexagonal	116
6.3.	Análisis en las Pruebas Experimentales para la Ley o grado de Concentrado de Cobre con Diseño Hexagonal.	121

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1.	Conclusiones	126
------	--------------	-----

7.2. Recomendaciones	127
ASPECTOS OPERATIVOS	128
A. MATRIZ DE CONSISTENCIA	128
Referencia Bibliográfica	130
Anexos	131

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Comportamiento de las Partículas en una Celda de Flotación	9
Figura 2 Factores de Interacción en la Flotación	11
Figura 3 Comportamiento del Proceso en una Celda de Flotación.....	16
Figura 4 Comportamiento de la burbuja de Aire y el Mineral Valioso	18
Figura 5 Angulo de Contacto	20
Figura 6 Representación de un Colector.....	27
Figura 7 Clasificación de Colectores	28
Figura 8 Esquema de Adsorción de Espumante en una Burbuja de Aire	31
Figura 9 Configuración de Circuito de Flotación Convencional	38
Figura 10 Funcionamiento de una Celda de Flotación	39
Figura 11 Principios de Funcionamiento de Partículas	40
Figura 12 Secuencia de Procedimiento Experimental	48

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Leyes de Molibdeno de Tajo Pampacancha	51
Gráfico 2: Distribución Granulométrica de Moliendabilidad.....	56
Gráfico 3: Perfil Granulométrico	59
Gráfico 4: Distribución de Análisis Granulométrico Experimental vs G-G-S	61
Gráfico 5: Tendencia de F80.....	63
Gráfico 6: Esquema de Pruebas de Corrida en Laboratorio	65
Gráfico 7: Grafica de Rango de Variables.....	68
Gráfico 8: Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados	92
Gráfico 9: Grafica de Efectos Principales para % Recuperación	92
Gráfico 10: Grafica de Cubos (Medias ajustadas) de % de Recuperación	93
Gráfico 11: Grafica de contorno de %Recuperación vs Colector y Granulometría	94
Gráfico 12: Grafica de Superficie de %Recuperación vs Colector, Granulometría	94
Gráfico 13: Rango de Variables Determinadas para Flotación Selectiva.....	102
Gráfico 14: Diagrama de Pareto de los efectos Flotación Selectiva.....	112
Gráfico 15: Grafica de Efectos Principales para Ley en Flotación Selectiva	112
Gráfico 16: Gráfico de Cubos (Medias Ajustadas) de Ley (%).....	113
Gráfico 17: Grafica de Contorno de Ley (%) vs Dosificación del Depresor y pH.....	113
Gráfico 18: Superficie de Ley (%) vs Dosificación del Depresor y pH en Flotación Selectiva.....	114
Gráfico 19: Gráfica de Superficie para % Recuperación de Cu	117
Gráfico 20: Grafica de Superficie de % Recuperación de Cu vs Granulometría(%malla), Colector	118
Gráfico 21: Contorno de % Recuperación de Cu vs Granulometría y Dosificación del Colector.....	119

Gráfico 22: Grafica de Optimización de % de Recuperación de Cobre	120
Gráfico 23: Grafica de Dispersión de %Recuperación Cu vs Granulometría, Colector(g/T)	120
Gráfico 25: Grafica de Efectos Principales de Ley de Concentrado (Grado de Concentrado).....	122
Gráfico 24: Gráfica de Contorno de Ley (%) vs Bicromato de Sodio(g/TM) y pH	122
Gráfico 26: Grafica de Superficie de Ley (%) en Función de las variables Objetivo Especifico.....	123
Gráfico 27: Grafica de Optimización de Ley (%) de Cobre en del Concentrado	124
Gráfico 28: Grafica de Dispersión de ley (%) vs Bicromato de Sodio(g/T), pH.....	124

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Minerales de Cobre	33
Tabla 2: Operacionalización de Variables	43
Tabla 3: Análisis Químico de mineral de cobre	50
Tabla 4: Determinación de Gravedad Especifica de la Muestra.....	53
Tabla 5: Diseño y Características del Molino de Bolas (Laboratorio)	54
Tabla 6: Parámetros Operativos para la Operación de Molino de Bolas en el Laboratorio	54
Tabla 7: Distribución de Medios Moledores	55
Tabla 8: Tiempo de Moliendabilidad.....	55
Tabla 9: Resultado de Tiempo de Molienda.....	57
Tabla 10: Distribución Granulométrica	59
Tabla 11: Cuadro de Resultados de Distribución Experimental y modelo G.G.S.....	61
Tabla 12: Condiciones de Trabajo en Laboratorio	67
Tabla 13: Rango de Variables.....	68

Tabla 14: Plantilla de Diseño Experimental Codificada y Real	69
Tabla 15: Preparación de Pulpas.....	72
Tabla 16: Consumo de Reactivos para las Pruebas	73
Tabla 17: Dosificación de Reactivos	74
Tabla 18: Parámetros de Operación para Granulometría.....	75
Tabla 19: Parámetros de Operación.....	75
Tabla 20: Dosificación y Condiciones dadas para la Flotación Bulk Prueba N°1	78
Tabla 21: Balance Metalúrgico para la Flotación Bulk Prueba N°1	79
Tabla 22: Condiciones operativas para la Flotación Bulk Prueba N°2.....	79
Tabla 23: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk Prueba N°2	80
Tabla 24: Condiciones Operativas para la Flotación Bulk Prueba N°3.....	80
Tabla 25: Balance Metalúrgico Prueba N°3	81
Tabla 26: Condiciones Operativas Para la Flotación Bulk Prueba N°4	81
Tabla 27: Balance Metalúrgico de Prueba N°4	82
Tabla 28: Condiciones Operativas para la Prueba N°5	82
Tabla 29: Balance Metalúrgico de Prueba N°5	83
Tabla 30: Condiciones Operativas para la Prueba N°6	83
Tabla 31: Balance Metalúrgico de la Prueba N°6	84
Tabla 32: Condiciones Operativas para la Prueba N°7	84
Tabla 33: Balance Metalúrgico de la Prueba N°7	85
Tabla 34: Condiciones Operativas para la Prueba N°8	85
Tabla 35: Balance Metalúrgico de la Prueba N°8	86

Tabla 36: Condiciones Operativas para la Prueba N°9	86
Tabla 37: Balance Metalúrgico de la Prueba N°9	87
Tabla 38: Condiciones Operativas para la Prueba N°10	87
Tabla 39: Balance Metalúrgico de la Prueba N°10	88
Tabla 40: Condiciones Operativas para la Prueba N°11	88
Tabla 41: Balance Metalúrgico de la Prueba N°11	89
Tabla 42: Tabla de Recuperaciones en las Pruebas Rougher (Flotación Bulk).....	89
Tabla 43: Resumen y Significancia del Modelo Estadístico	90
Tabla 44: Análisis de Varianza.....	90
Tabla 45: Ecuación de Regresión en Unidades no Codificadas	91
Tabla 46: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°1	96
Tabla 47: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°2	96
Tabla 48: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°3	97
Tabla 49: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°4	97
Tabla 50: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°5	97
Tabla 51: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°6	98
Tabla 52: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°7	98
Tabla 53: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°8	98
Tabla 54: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°9	99
Tabla 55: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°10	99
Tabla 56: Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°11	99
Tabla 57: Resumen de Recuperaciones de Plomo en el Concentrado Bulk	100

Tabla 58: Rango de Variables para Flotación Selectiva	101
Tabla 59: Parámetros y Condiciones para la Prueba N°1 Flotación Selectiva	103
Tabla 60: Balance Metalúrgico Flotación Selectiva de la Prueba N°1	103
Tabla 61: Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°2.	104
Tabla 62: Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva de la Prueba N°2	104
Tabla 63: Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°3	105
Tabla 64: Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva Prueba N°3.....	105
Tabla 65: Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°4	106
Tabla 66: Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva d la prueba N°4	106
Tabla 67: Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°5	107
Tabla 68: Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva N°5.....	107
Tabla 69: Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°6	108
Tabla 70: Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva de Prueba N°6	108
Tabla 71: Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°7	109
Tabla 72: Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva Prueba N°7.....	109
Tabla 73: Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°8	110
Tabla 74: Balance Metalúrgico de flotación Selectiva Prueba N°8	110
Tabla 75: Resumen de Parámetros en Cada Prueba Experimental y Resultados	111
Tabla 76: Ecuación de Regresión	111
Tabla 77: Matriz de Consistencia	129

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AP-3418	Aerophine - 3418
AR-404	Aeropromoter - 404
ASTM	American Society for Testing and materials
cm ³	Centímetro cúbico
CN	Cianuro
Cu	Cobre
Cos θ	Coseno del ángulo θ
D-12	Denver - 12
DF-400	Dowfroast - 400
PbS	Galena
g	Gramos
Fe	Hierro
K	Kelvin
m	Metro
μ m	Micrómetros
mm	Milímetro
Min	Minutos
Ni	Níquel
N°	Número
DO	Oxígeno disuelto
FeS	Pirita
Ag	Plata
%	Porcentaje
Rt	Recuperación estimada
R ∞	Recuperación limite a tiempo infinito
rpm	Revoluciones por minuto
S	Siemens
NaSH	Sulfuro ácido de sodio
ZnS	Sulfuro de zinc
γ GL	Tensión gas liquido
γ GS	Tensión gas solido
γ SL	Tensión solida liquido
t	Tiempo
Tn	Toneladas
w	Watts
Z-6	Zantato amílico de potasio
Zn	Zinc
GE	Gravedad específica
GL	Grado de libertad

RESUMEN

La presente investigación tecnológica experimental tuvo como objetivo principal mejorar la recuperación de concentrado de cobre mediante la optimización del proceso de flotación selectiva deprimiendo el plomo. Las pruebas metalúrgicas se realizaron en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), utilizando muestras representativas del yacimiento de Pampacancha, con una composición de 1.20% cobre y 8% de plomo. Durante el estudio se analizaron las variables operativas del proceso de flotación como: tamaño de grano, pH y concentración de reactivos para optimizar la recuperación de concentrado de cobre en las pruebas experimentales. El mineral fue chancado y molido hasta alcanzar una granulometría de malla 200, con un 65% de material pasante. Esta condición fue seleccionada para asegurar una liberación adecuada de las especies sulfuradas de cobre. Durante los ensayos, se utilizó como colector el reactivo Z-6 de 35-40 g/T y una dosificación de bicromato de sodio de 5g/T. Los resultados indicaron una recuperación del 92.5% de concentrado de cobre, también en la flotación selectiva se determinó la significancia positiva del pH para la separación cobre plomo, también con la dosificación del bicromato de sodio en la etapa de flotación selectiva tuvo un efecto positivo en relación en la separación de cobre plomo. Se obtuvo una recuperación de 92.5% de cobre en el concentrado Rougher se debe llegar a una granulometría de 65%-malla200 en el overflow de los hidrociclones como producto de la etapa de molienda

Palabras clave: Flotación selectiva, recuperación de cobre, bicromato de sodio, colector (Z-6).

ABSTRACT

The main objective of this experimental technological investigation was to improve copper concentrate recovery by optimizing the selective flotation process, depressing lead. Metallurgical tests were performed at the mineral processing laboratory of the National University of San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), using representative samples from the Pampacancha deposit, with a composition of 1.20% copper and 8% lead. During the study, operational variables of the flotation process were analyzed, such as grain size, pH, and reagent concentration, to optimize copper concentrate recovery in the experimental tests. The ore was crushed and ground to a 200-mesh particle size, with 65% passing material. This condition was selected to ensure adequate release of copper sulfide species. During the tests, reagent Z-6 was used as a collector at 35-40 g/T and a sodium dichromate dosage of 5 g/T. The results indicated a recovery of 92.5% of copper concentrate, also in the selective flotation the positive significance of the pH for the copper lead separation was determined, also with the dosage of sodium bichromate in the selective flotation stage it had a positive effect on relationship in the separation of copper lead. A recovery of 92.5% of copper was obtained in the Rougher concentrate, a granulometry of 65%-200 mesh must be reached in the overflow of the hydrocyclones as a product of the grinding stage.

Keywords: Selective flotation, copper recovery, sodium bichromate, (Z-6) collector.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

El proceso de flotación es una de las principales etapas en el beneficio de minerales sulfurados, especialmente en la recuperación de minerales valiosos como el cobre. Este proceso se basa en las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas minerales, aprovechando la diferencia entre su carácter hidrofóbico o hidrofílico para poder lograr su separación.

Actualmente en la Unidad Minera Constanca se ha visto enfrentar a problemas operacionales, siendo, en esta ocasión la principal preocupación, la baja recuperación y grado de liberación en los concentrados de cobre obtenida por procesos de flotación, afectando al cumplimiento en los KPIs (Indicadores de Rendimiento/Calidad) establecidos. Esto principalmente por la presencia de minerales con características mineralógicas complejas de tipo skarn, hipogeno y supergeno en donde existe presencia de calcopirita con 30.5 % de Fe y 35% de azufre y minerales mixtos, los cuales muchas veces dificultan el tratamiento del mineral. Una de estas características corresponde al contenido de plomo, principalmente la galena con 86.6% de Pb, situación preocupante que afecta al grado de concentrado final, ya que el yacimiento Pampacancha cuenta con esta mineralogía, por lo tanto, es importante su evaluación de la separación de Cu-Pb en los procesos de flotación selectiva con la ayuda de la aplicación y administrar el Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$).

1.2. Formulación de Problemas

1.2.1. Problema General

¿Se podrá separar el plomo del cobre por flotación selectiva con uso de reactivos específicos para optimizar la recuperación del cobre en la Unidad Minera Constancia?

1.2.2. Problema Específico

- a) ¿Cuál será la granulometría óptima del mineral para para la recuperación de cobre?
- b) ¿Cuál será el pH adecuado del proceso de flotación selectiva para separar el cobre del plomo?
- c) ¿Será posible la separación de Pb-Cu con la adición de Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) para optimizar la ley o grado de concentrado de cobre?

1.3. Justificación

1.3.1. Conveniencia

Este trabajo de investigación se realiza con el fin de dar solución a la incertidumbre actual en la Unidad Minera Constancia (U.M.) del incumplimiento de los KPIs operacionales respecto a la recuperación y calidad del concentrado final. Para ello se pretende elevar su condición del concentrado de cobre y su recuperación en el proceso de flotación selectiva.

1.3.2. Relevancia Social

Las mejoras en la Unidad Minera Constanca a nivel operacional son muy influyentes para la colectividad, porque el régimen tributario minero aumentará, por lo tanto, tendrá mayor disponibilidad presupuestal para las inversiones futuras, también serán beneficiados todo el personal que labora y la población en general.

1.3.3. Relevancia Tecnológica

En la Industria Metalúrgica es importante determinar las variables adecuadas del tratamiento de minerales en el proceso de flotación. Por lo que la separación de Pb-Cu por medio de una nueva mezcla de reactivos, es necesario conocer la dosificación de los reactivos para mejorar la selectividad, a posterior considerar como una estrategia de operación en la planta concentradora.

1.3.4. Valor Teórico

La evaluación realizada ayudará a ampliar los conocimientos de la separación de Pb-Cu y el comportamiento de la nueva mezcla de reactivos para los operadores en procesos de flotación selectiva de Cobre para mejor tratamiento del mineral sulfurados y obtener una recuperación óptima de concentrado de Cobre.

1.3.5. Utilidad Metodológica

Mediante la evaluación del comportamiento de los reactivos en el circuito de flotación, a través del análisis granulométrico, pruebas de dosificación de reactivos, y la buena flotación selectiva; permiten con facilidad lograr la recuperación de cobre. Metodología que es eficiente para lograr los objetivos deseados.

1.4. Objetivos de la Investigación.

1.4.1. Objetivo General.

Separar el plomo del cobre por flotación selectiva con uso de reactivos específicos para para optimizar la recuperación del cobre en la U.M. Constanica

1.4.2. Objetivo Específico.

- a) Determinar la granulometría óptima del mineral para la recuperación de concentrado de cobre.
- b) Determinar el pH adecuado del proceso de flotación selectiva para separar el cobre del plomo.
- c) Determinar posible separación y dosificación adecuada de reactivo Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) para optimizar la recuperación y ley de concentrado de cobre.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales.

(Jiao, 2021), investigación publicada sobre la “***Sustitución del bicromato por mezclas depresoras en los sulfuros de cobre plomo en flotación***”. Se realizó en la Escuela de Procesamiento de Minerales y Bioingeniería de la Universidad Central del Sur la China. El objetivo de esta investigación es la sustitución del dicromato por un agregado depresor (sustancia húmica y peróxido de hidrógeno) en la flotación de un solo mineral y minerales binarios o mixtos a un pH 6.5. En este trabajo de investigación la metodología está basada en la experimentación en las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio utilizando el depresor (sustancia húmica y peróxido de hidrógeno).

En conclusión, los depresores combinados de sustancia húmica y el peróxido de hidrogeno fueron eficientes para separar la galena de la calcopirita para lograr un concentrado de plomo. En Las pruebas de disolución de iones y de adsorción indican que el peróxido de hidrógeno si puede acelerar la disolución de la red de galena y el peróxido de hidrógeno o Pb^{2+} puede promover la adsorción en la superficie de la galena.

(Ran, 2017) Investigación publicada sobre el “***tamaño de la partícula en el rendimiento de la flotación en la separación del cobre y plomo***”. Se realizó en el Laboratorio Estatal Clave de Utilización Limpia de Recursos de Metales No Ferrosos Complejos, Universidad de Ciencia y Tecnología de Kunming. El objetivo de esta investigación es poder ver de acuerdo al tamaño de partícula el rendimiento de separación cobre-plomo en función al tiempo de flotación con una

dosificación óptima del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y dietil ditiocarbamato de sodio, recolectando un producto de varias fracciones de espuma.

La metodología de esta investigación se basa en la experimentación y análisis de datos estadísticos en las pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio utilizando dicromato de potasio y dietil ditiocarbamato de sodio.

Las conclusiones los resultados demuestran que el fraccionamiento de tamaño favorece para la flotación de la separación cobre-plomo en un tamaño de $-74+20\mu m$, también se pudo determinar que es un modelo óptimo para el proceso de flotación, La eficiencia de separación con respecto a las fracciones de tamaño intermedio fue mayor que las fracciones de tamaño grueso y ultrafino, ya sea para la flotación de separación de cobre y plomo.

2.1.2. Antecedentes Nacionales.

(Medina Vargas , 2018) En la investigación publicada de: ***“Evaluación para la recuperación de concentrado de cobre a partir del concentrado bulk plomo-cobre en planta concentradora Ana María, brexia gold plata Perú S.A.C. de la Universidad Nacional de san Agustín de Arequipa”***, el objetivo principal, fue analizar la obtención de concentrados de cobre de la flotación bulk Pb-Cu, haciendo el uso del reactivo (colector/depresor). A la planta concentradora de la Empresa Minera Brexia Gold Plata Peru S.A.C. ingresa mineral asociado de cobre con alta y baja ley, provenientes de diferentes vetas contenidos de plomo que dificulta la comercialización por la penalización en la venta. La gerencia de operaciones solicito realización de pruebas metalúrgicas a nivel laboratorio para su liberación y obtención del concentrado de cobre a partir de la flotacion bulk Pb-Cu.

En la determinación de la liberación Pb-Cu que se realizó a nivel laboratorio, se llegó a la conclusión de que la obtención del concentrado de cobre es buena con la depresión de plomo y flotación de cobre con RCS (mezcla de reactivos al 20% CMC, 20% de Fosfato Monosódico y 60% Bicromato de Sodio), obteniendo una recuperación del 63.21 % de cobre con una ley comerciable de 27.12% para el concentrado de cobre más limpio.

(Paraguay Garcia, 2018) En su trabajo de Investigación: ***“Reemplazo parcial del bicromato por el bisulfito de sodio en la separación de sulfuros de Cu-Pb mediante flotación a nivel laboratorio de la universidad nacional del centro del Perú”***, el objetivo de este trabajo de investigación es Reemplazar el Bicromato de Sodio por el Bisulfito de Sodio en la separación cobre-plomo y reducir el impacto medioambiental que causa el Bicromato de Sodio. En la minería peruana los minerales polimetálicos están asociadas a especies mineralógicas complejas de Cobre-Plomo-Zinc-Fierro, la recuperación de las especies valiosas inician por el proceso de flotación, en donde se obtiene un concentrados bulk Cu-Pb, en la actualidad la separación de sulfuros de plomo-cobre se realiza con la depresión de la galena mediante el uso de reactivo depresor RCSC, este método es duramente criticado por la contaminación ambiental por las propiedades tóxicas del cromo. Para ello se plantea una alternativa de reemplazar el uso de Bicromato de Sodio por Bisulfito de Sodio, reactivo biodegradable con el fin de reducir el impacto ambiental.

En esta investigación se llegó a las siguientes conclusiones: El Bisulfito de Sodio puede reemplazar eficientemente al Bicromato de Sodio como un reactivo depresor de la galena en los circuitos de flotación Cobre-Plomo. También la ley del concentrado de cobre incremento de 18 a 25% Cu y la recuperación de 59 a 67%Cu, estos resultados se obtuvieron al reemplazar 83% de

Bicromato por el Bisulfito de Sodio, el consumo del depresor (Bicromato +Bisulfito) se ha mantenido en 180 g/t. por lo tanto, el impacto ambiental disminuyó.

2.2.Bases Teóricas.

2.2.1. Flotación de Minerales.

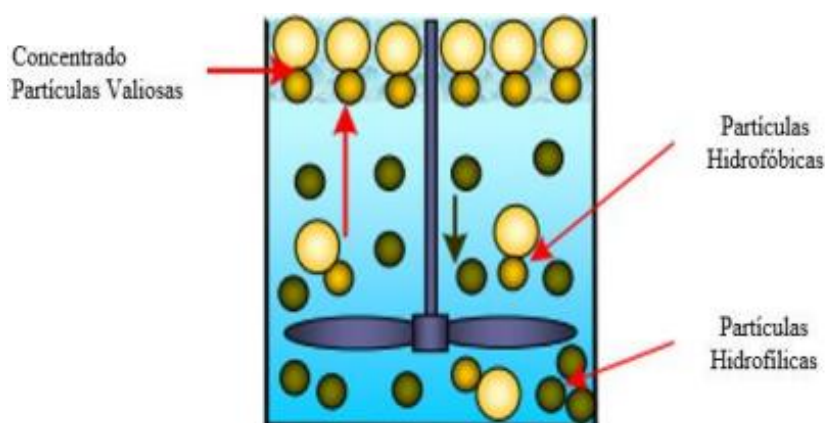
La flotación es un proceso de concentración de minerales sulfurados que permite separar diferentes especies mineralógicas desde una pulpa acuosa. Esta separación se basa en las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas de los minerales, los cuales son transportados por burbujas de aire hacia la superficie, formando una espuma que permite su recolección. Los yacimientos mineros en los andes del Perú hoy en día se encuentran minerales complejos para su tratamiento, por lo tanto, cada vez más la concentración de minerales sulfurados se presentan más dificultades para su obtención de especies valiosas. La selectividad en la flotación se desarrolla mediante el uso de diferentes reactivos, el cual extrae minerales de cobre hidrofóbicos con un acondicionamiento adecuado de la pulpa y liberación de partículas en el proceso de chancado y molienda de minerales. En ese sentido el proceso de flotación es muy importante en la industria minera, que sin ella no se habría podido llegar al presente nivel de producción y poder satisfacer las demandas y necesidades de la civilización, este proceso también logra recuperar minerales denominados desechos y de baja ley, de este modo las reservas disponibles han aumentado enormemente.

En flotación es necesario entender sobre el mecanismo por espumas que ocurre en una celda, el contacto de mineral y burbujas de aire para su formación estable. Todo este comportamiento parte de las propiedades químicas de los minerales y reactivos, existen minerales

con propiedades hidrofóbicas naturales como: Los metales nativos, sulfuros de metales, grafito, talco y otros, por otra parte los sulfuros, óxidos, carbonatos y otros pueden ser mojados por el agua (Hidrofílicos), los minerales hidrofóbicos también se les puede llamar aerofílicos, porque tienen mucha afinidad con las burbujas de aire y los minerales hidrofílicos se les puede llamar aerofóbicos, porque no se adhieren a ellas, como se puede ver en la Figura N°. 1

Figura 1

Comportamiento de las Partículas en una Celda de Flotación



Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P. 2), por Linares, N. (2014).

2.2.2. Variables Operacionales en el proceso de Flotación

Estas variables son muy importantes considerarlos en los procesos de flotación de concentrados de Cu:

- a) **Granulometría:** La obtención de concentrado de cobre depende mucho del grado de liberación de partículas que son valiosas de las complejas que se encuentran asociadas o encapsuladas, por lo tanto, es importante llegar a un grado de liberación adecuada.

- b) **Tipo de Reactivo:** Existe diferentes tipos de reactivos como: Colectores, modificadores y espumantes. Su eficiencia en el proceso dependerá de su selección y dosificación del reactivo.
- c) **Densidad de la Pulpa:** Un porcentaje de sólidos adecuado en el proceso influirá bastante en la recuperación de cobre en la etapa de flotación y el tiempo de residencia del mineral en los circuitos, por lo tanto, en la calidad del concentrado.
- d) **Aireación:** El aire es imprescindible por lo que permite aumentar o disminuir la flotación que beneficia la obtención y ley del concentrado.
- e) **Regulación del pH:** Cada fórmula a usar tiene un pH óptimo, ambiente en el cual se obtendrá mejores resultados operacionales, también, dependerá del tipo del mineral que ingresa al circuito de flotación.
- f) **Tiempo de Residencia:** Esta variable dependerá de la cinética de flotación de los minerales, cinética de los reactivos, volumen de las celdas y porcentaje de sólidos en el circuito.
- g) **Calidad de Agua:** La calidad de agua en el proceso influye bastante en la recuperación y grado del concentrado, por lo que presenta iones, sólidos en suspensión que perjudican la reacción de reactivos y minerales.

La flotación presenta tres factores importantes que interactúa dentro de un sistema, estos sistemas tienen comportamientos interdependientes, a cual a este sistema se da un análisis minucioso en los procesos de flotación de minerales, como se ve la Figura N°2

Figura 2*Factores de Interacción en la Flotación*

Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P. 77), por Linares, N. (2014).

2.2.3. P80:

Se considera el tamaño de partícula en el cual el 80% del material pasa a través de un tamiz, es decir el 80% de las partículas son más pequeñas que ese tamaño que está expresado en micrones. (Hudbay, 2023)

El P80 y F80 es la razón de reducción(R80), el cual es el resultado de la conminución, se determina por la siguiente Ecuación 1:

$$R80 = \frac{\text{Tamaño del Alimento}}{\text{Tamaño del Producto}} = \frac{F80}{P80} \quad (1)$$

Los conceptos de conminución son muy importantes, permite conocer la relación de energía consumida y grado de liberación del tamaño de partículas, se detalla estas teorías relacionadas a P80:

a) Ley de Rittnger:

Esta ley nos dice que la energía requerida para reducir de tamaño es proporcional a su aumento de su superficie, esto hace que se mas valida cuando se pueda trabajar con materiales finos , esto se da a conocer en la siguiente Ecuación 2: (Linares Gutiérrez, 2009)

$$E_R = K_R \left[\left(\frac{1}{P_{80}} \right) - \left(\frac{1}{F_{80}} \right) \right] \quad (2)$$

Donde:

E_R =Energía especifica de conminución (kWh/ton)

K_R =Constante de Rittinger

P_{80} = Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto

F_{80} = Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación

b) Ley de Kick,

Nos dice que es la energía requerida para poder reducir el tamaño de una partícula es directamente proporcional a reducción del mineral, también, se considera que es la energía necesaria para fracturar el sólido hasta su deformación de límite de ruptura. En la práctica se ha demostrado en su mayoría en molienda de finos. Ello se define mediante la Ecuación 3: (Linares Gutiérrez, 2009)

$$E_k = K_K \log \left(\frac{F_{80}}{P_{80}} \right)$$

(3)

Donde:

E_k =Energía específica de conminución (kWh/ton)

K_K =Constante de Kick

P_{80} = Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto

F_{80} = Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación

c) Ley de Bond:

Es la energía consumida para la reducción del tamaño de 80% de un mineral, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño de 80%; siendo este último igual a la abertura de malla en micrones, que deja pasar el 80% en peso de las partículas. (Linares Gutiérrez, 2009), ello se detalla en la siguiente Ecuación 4: (Linares Gutiérrez, 2009)

$$E_B = K_B \left[\left(\frac{1}{P_{80}} \right) - \left(\frac{1}{F_{80}} \right) \right] \quad (4)$$

Se define la variable K_B en función del Work Index (Wi), que es igual al trabajo, que esta expresamos en Kw-h/t, el cual describimos en la siguiente Ecuación 5:

$$W_i = K_B \left[\left(\frac{1}{100^{\frac{1}{2}}} \right) - \left(\frac{1}{\alpha^{\frac{1}{2}}} \right) \right] = \frac{K_B}{10} \quad (5)$$

Donde:

$$K_B = 10W_i$$

Reemplazando tenemos la Ecuación 6:

$$E_B = W = 10Wi \left[\left(\frac{1}{\sqrt{P80}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{F80}} \right) \right] \quad (6)$$

Donde:

$E_B = W$ = Energía específica de conminución (kWh/ton)

Wi = Índice de trabajo del material (Kwh/ton corta)

$P80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto (μm)

$F80$ = Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación (μm)

2.2.4. Mecanismo y Cinética de la Flotación

2.2.4.1. Mecanismo de la flotación.

Es aquello que interacciona entre las partículas de mineral más una burbuja de aire en donde estas forman una superficie estable. Como sabemos que las partículas de minerales tienen propiedades hidrofóbicas suficientemente estables para que puedan transportarse a la superficie. En primer lugar, en la gran mayoría de los casos hay que romper enlaces químicos (covalentes y iónicos principalmente) para efectuar la liberación del mineral. (Sutulov, 1993)

En flotación es importante hidrofobizar las partículas de mineral en la pulpa para que puedan ser flotables y esto con la ayuda de reactivos conocidos como colectores, que son compuestos orgánicos heteropolares, es decir, una parte de esta molécula se considera compuesto apolar (hidrocarburo) y la otra es grupo polar con propiedades iónicas.

Para hacer más eficiente la adsorción de los reactivos sobre la superficie de las partículas minerales hay que crear condiciones favorables en la capa doble de cargas eléctricas, esto generalmente se realiza en los modificadores. Los cuales disminuyen el potencial de la capa doble o difieren su sentido. Por lo tanto, se generan condiciones favorables para la adsorción de los reactivos como colectores, modificadores. (Sutulov, 1993).

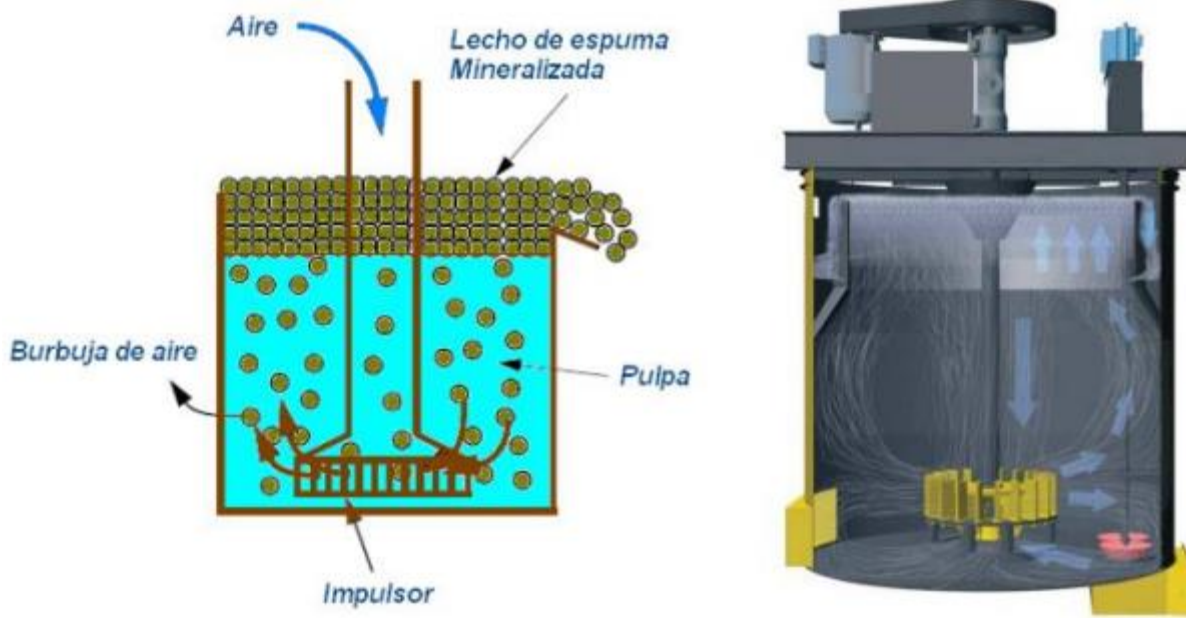
En metalurgia de flotación la película de agua no llega a romperse por completo en donde se encuentra cubierto por películas de moléculas de agua y las moléculas son participes en las uniones posteriores de la flotación. Se considera que la película de agua tiene propiedades diferentes del agua en masa.

Hoy en día el concepto de dinámica del contacto de la burbuja y partícula, se considera el encuentro de como ocurre la colisión entre dos cuerpos elásticos. Esto significa que los cuerpos chocan y rebotan. Para un mejor entendimiento del comportamiento (Ver Figura N°3) (Sutulov, 1993)

El mecanismo de flotación contempla dos factores de relevancia como: El tamaño de partícula (fuerza dinámica) y mojabilidad (condiciones eléctricas).

Figura 3

Comportamiento del Proceso en una Celda de Flotación



Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P.7), por Linares, N. (2014).

2.2.4.2. Interpretación Termodinámica del Fenómeno.

La flotación de minerales se entiende en base a las propiedades hidrofóbicas que tienen las partículas y la facilidad de adherirse y nacer burbujas estables de aire.

La interpretación termodinámica del fenómeno de flotación es cuando la fuerza de unión de partículas entre y la burbuja de aire, en estas uniones moleculares se genera una fuerza termodinámica que tiende a reducir un sistema cerrado a un mínimo de energía libre. (Linares Gutiérrez, 2009)

2.2.4.2.1. Comportamiento Hidrofóbico.

Son aquellos minerales que no tienen la propiedad de mojarse con agua como: Los metales nativos, grafito, carbón bituminoso, talco y otros, esta propiedad natural de no mojarse con agua, por lo tanto, no pueden adherirse a las burbujas de aire y ascender.

2.2.4.2.2. Comportamiento Hidrofílico.

Son aquellos minerales que tienen la propiedad de ser mojables con agua como: óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros, con esta propiedad generalmente están los minerales no comerciables o gangas que permanecen en suspensión dentro de la celda de flotación y hundirse.

2.2.4.2.3. Interpretación Termodinámica.

En primer lugar, es poco precisa, pues no contempla todos los detalles del mecanismo de la flotación. Esta es la razón porque no puede tener aplicaciones prácticas. En segundo lugar, las condiciones termodinámicas que tienen que cumplirse para esta deducción (irreversibilidad del sistema y ausencia de variación de temperatura y presión) no se cumplen.

Como se sabe, la termodinámica sólo indica la probable dirección del proceso, pero no discute ni su velocidad (cinética) ni su mecanismo.

2.2.4.2.4. Burbujas de Aire en Flotación.

Se considera que las burbujas siempre se generan por el movimiento del rotor al interior de la celda, estos están controlados mediante flujómetros de aire, estos rotores giran con gran velocidad y crean zonas de baja presión en la pulpa y permiten el burbujeo del aire disuelto en el agua.

La buena parte de este mecanismo es participe el aire como medio transporte de las partículas minerales proviene de la agitación mecánica de rotores y aireación de la pulpa. (Ver Figura N°4) (Tarazona Trujillo, 2012)

Figura 4

Comportamiento de la burbuja de Aire y el Mineral Valioso



Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P.5), por Linares, N. (2014).

2.2.4.3. Unión de Burbuja con la Partícula Mineral.

Esta unión es el punto fundamental y todavía no definitivamente aclarado de la teoría de la flotación. La discusión principal giraba generalmente al rededor del contacto trifásico y de la participación de las películas hidratadas en el proceso de acercamiento y reunión de la burbuja con la partícula mineral.

Los presentes conceptos de este mecanismo son los siguientes: la burbuja de aire tiene una película hidratada que proviene de la asociación íntima entre las partes polares de las moléculas tensoactivas del espumantes y de las moléculas polarizadas del agua.

Al estar en contacto las partículas hidratadas se produce una resistencia a la unión y asociación directa entre la burbuja y la partícula. Esta resistencia proviene del esfuerzo que hay que aplicar para romper y separar las moléculas de agua asociadas en forma de películas firmes alrededor de la burbuja y partícula de mineral. La reunión final se produce como resultado de una eliminación rápida de parte del agua que se encuentra en las películas. Este salto es todavía poco conocido y representa el punto oscuro de la teoría de flotación. Sin embargo, su existencia ha sido confirmada experimentalmente consideramos tres casos: (Sutulov, 1993)

- a) Cuando la partícula es hidrofílica y está completamente hidratada.
- b) Cuando la partícula esta medianamente hidratada.
- c) Cuando la partícula es hidrofóbica, o sea, casi no está hidratada.

Los buenos colectores disminuyen la película hidratada del mineral y los buenos depresores la aumentan, facilitando o dificultando de este modo la asociación de la partícula con la burbuja como lo demuestran.

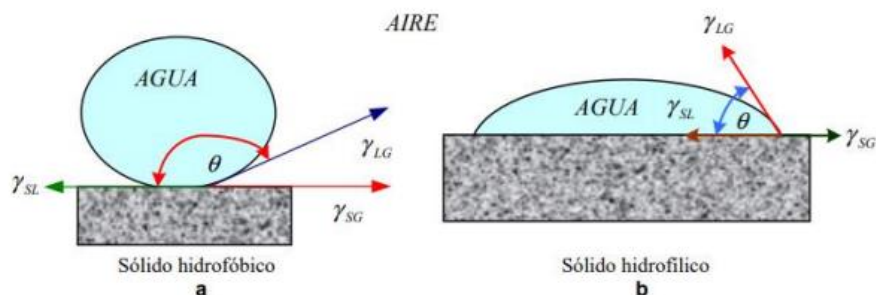
2.2.4.4. Termodinámica de Majamiento o Interfases

Desde el punto de vista físico-químico, la superficie de un mineral, se caracteriza en energizadas superficies escasas y altamente energizadas, esto sucede principalmente cuando su superficie del cuerpo cristalino se formada con la ruptura de los cristales, es la forma destruyendo una cantidad de uniones entre átomos que lo constituyen. Es decir, entre mayor es la fuerza entre átomos se requiere mayor energía para romper por ende mejor será la instauración de la superficie nueva recién creada y más energizada. (Sutulov, 1993)

2.2.4.5. Angulo de Contacto y ecuación de Young.

Figura 5

Angulo de Contacto



Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P.21), por Linares, N. (2014).

En flotación de minerales el ángulo de contacto está formado por un plano tangente a la interfase Líquido-Gas con el plano formado por el sólido en un contacto trifásico Sólido-Líquido-Gas, que da la capacidad de mojabilidad. Cuando el sólido es mojado por completo por el líquido, entonces el ángulo de contacto es igual a cero, en cambio un ángulo ($\theta > 0^\circ$), la mojabilidad será mínimo, por lo tanto, mayor grado de hidrofobicidad. La ecuación de Young establece un equilibrio entre las tres fases e introduce la definición de hidrofobicidad es un factor muy importante en flotación de minerales. El esquema se puede ver en la siguiente Figura N°5. (Linares Gutiérrez, 2009)

$$\cos \theta \gamma_{LG} = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (7)$$

Donde, el factor de $\cos \theta$ γ_{LG} se denomina tensión de adhesión, que requiere una fuerza requerida para que exista una hidrofobización de las partículas sólidas. También se puede deducir de la ecuación de Young lo siguiente:

$\gamma_{SG} > \gamma_{SL} \rightarrow$ El ángulo θ de contacto será $< 90^\circ$

$\gamma_{SG} < \gamma_{SL} \rightarrow$ El ángulo θ de contacto será $> 90^\circ$

Para que pueda haber un contacto estable debe cumplirse lo siguiente:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} < \gamma_{LG}$$

Cuando el líquido moja al sólido se obtiene la forma:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} > \gamma_{LG}$$

2.2.4.6. Cinética de Flotación

Estudia una variación del contenido metálico fino recuperado en un concentrado con respecto al tiempo para la adhesión de la partícula hidrofóbica con la burbuja de aire. La cinética también se caracteriza por la variación en el tiempo de la cantidad de especies valiosas transportadas por espumas cargados de mineral con alta concentración hacia el rebose de una celda de flotación, es decir, se relaciona el tiempo de flotación con la cantidad de producto obtenido.

A la velocidad de flotación pueden afectar numerosas variables como mecánicas y químicas, el requisito fundamental para la flotación son dos criterios químicos y termodinámicos que determina la hidrofobicidad de los minerales. Este proceso puede basarse en términos de

concepto en un conjunto de subprocesos como: El transporte de la espuma y pulpa, la adhesión de las partículas a las burbujas y remoción del producto de flotación con los relaves.

Cuando una burbuja es transportada hacia la interface espuma y pulpa, en donde la ganga queda debajo de las espumas, mientras la liquida separa a las dos precipitando lentamente minerales hidrofílicos. Las burbujas nuevas que se forman empujan a las primeras hacia la zona de la espuma con el objetivo de cargarse el mineral valioso, la fase espumosa tiene el rol de la interacción muy significativa en la optimización del grado y recuperación de sulfuros de cobre en el proceso de flotación. Entonces se asume que estos parámetros que controlan la velocidad de flotación se determinan por los efectos que ocurre en la pulpa del proceso. Esta teoría de la cinética de flotación de minerales se expresa de la siguiente forma: (Linares Gutiérrez, 2009)

$$\frac{dC_p}{dt} = k \cdot C_p^n \cdot C_b^m \quad (8)$$

Donde:

C_p : Concentración de Partículas

C_b : Concentración de Burbujas

t: Tiempo de Flotación

k: Constante de Razón

n y m: Orden de Ecuación

Cuando se suministra aire de manera seguida, hay tendencia del cambio en la concentración de las burbujas son pequeñas, entonces C_b es pequeño, en esta condición la ecuación de velocidad se convierte en:

$$\frac{dC_p}{dt} = k \cdot C_p^n \quad (9)$$

Si $n=1$. Tenemos

$$\frac{dC_p}{dt} = k \cdot C_p$$

Usando las condiciones de limite, se tiene:

$$C = C_o \text{ cuando } t = 0$$

$$C = C_t \text{ cuando } t = 1$$

Finalmente se obtiene:

$$\ln \frac{C_1}{C_0} = -kt$$

Despejando C_1 :

$$C_1 = C_0 \exp(-kt)$$

2.2.4.7. Modelos Cinéticos de Flotación de Minerales

A. **Modelo de García Zúñiga.** expresada la cinética química mediante esta Ecuación

Nº10: (Linares Gutiérrez, 2009)

$$-\frac{dc}{dt} = k \cdot C^n \quad (10)$$

Donde:

c = Concentración de especies a flotar

n = Orden de reacción

k = Constante específica de velocidad de flotación

t = Tiempo de flotación

Y la obtención en función del tiempo está descrita por la ecuación: N°11:

$$R_t = R_{\infty} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (11)$$

Donde:

R_t = Recuperación acumulativa en tiempo

R_{∞} = Recuperación máxima posible es asintótica

k = Constante específica, velocidad de flotación

t = Tiempo de flotación

B. Modelo de Agar Barret. El modelo surge de las modificaciones hechas a esta ecuación de García Zuñiga, su objetivo principal es calcular el tiempo óptimo de flotación y sus parámetros del modelo para poder determinar la recuperación en un determinado tiempo de flotación. (Linares Gutiérrez, 2009)

$$R(t) = R_{\infty} [1 - e^{-k(t+\theta)}] \quad (12)$$

Donde:

θ = Parámetro que permite la curva ajustada pase el origen

t = Tiempo de flotación

R_{∞} =Recuperación límite a tiempo

k =Constante de cinética de flotación

$R(t)$ =Recuperación acumulativa en tiempo (%)

C. Modelo de Klimpel. – modelo que pone interés en calcular de k para seleccionar los reactivos de flotación, también es utilizada para hacer ajustes de los datos experimentales para el cálculo de parámetros cinéticos. (Linares Gutiérrez, 2009)

$$R(t) = R_{\infty} \left[1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right] \quad (13)$$

Donde:

t : Tiempo de flotación

R_{∞} : Recuperación límite a tiempo

k : Constante de cinética flotación

$R(t)$ =Recuperación acumulativa en el tiempo (%)

2.2.4.8. Reactivos de Flotación

En estas últimas décadas existen minerales que son naturalmente hidrofílicos y complejos con presencia de contaminantes que dificultan la selectividad de las especies mineralógicas valiosas de las gangas, para esto se requiere una serie de reactivos químicos para recuperar

selectivamente y volverlos hidrofóbicos las especies valiosas, esto se logra mediante la dosificación, regulación adecuada de la química de la solución acuosa en la sustitución de iones, pH ajustado entre otros, esta regulación se realiza agregando reactivo llamado colector que tiene la propiedad de absorber minerales hidrofóbicos, también se considera la dosificación de un específica de los activadores, que sirven para crear condiciones favorables en las superficies de los minerales que se desea obtener.

Los reactivos depresores tienen una relevancia en el proceso de flotación porque evitan la adsorción de un colector por un mineral volviéndolo hidrofílico, por lo tanto, no flotable. Nos permite una clasificación óptima del mineral valioso en el circuito de flotación, también en ese mismo aspecto es significativo considerar la utilización de dispersantes, para un mejor acondicionamiento y que las partículas estén libres para lograr su selección por las burbujas de aire. En caso de espumantes permiten la formación de las espumas estables con un tamaño adecuado de burbujas para transportar los minerales valiosos al concentrado. (Tarazona Trujillo, 2012)

2.2.4.8.1. Collectores

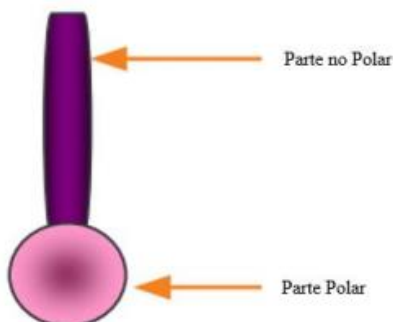
Estos reactivos son compuestos orgánicos de estructura asimétrica y heteropolar, este reactivo tiene la propiedad de adsorberse en la superficie del mineral valioso donde se hidrofóbiza y seleccionar en la pulpa las especies valiosas, crea condiciones para reducir la energía libre de un mineral húmedo, es decir mojado, al punto donde es posible una formación de contacto de fases(Aire-Agua-mineral), con el fin de favorecer la adherencia de la partícula mineral a la burbuja. (Linares Gutiérrez, 2009)

Los colectores tienen dos partes estos son:

- a) Parte Polar
- b) Parte no Polar

Figura 6

Representación de los Colector



Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P.38), por Linares, N. (2014).

2.2.4.9. Clasificación de los Colectores

Los colectores se distribuyen en dos grupos importantes que son disparejos.

- a) colectores aniónicos, que representan la mayoría de los reactivos.
- b) colectores catiónicos, que representa a un grupo muy reducido.

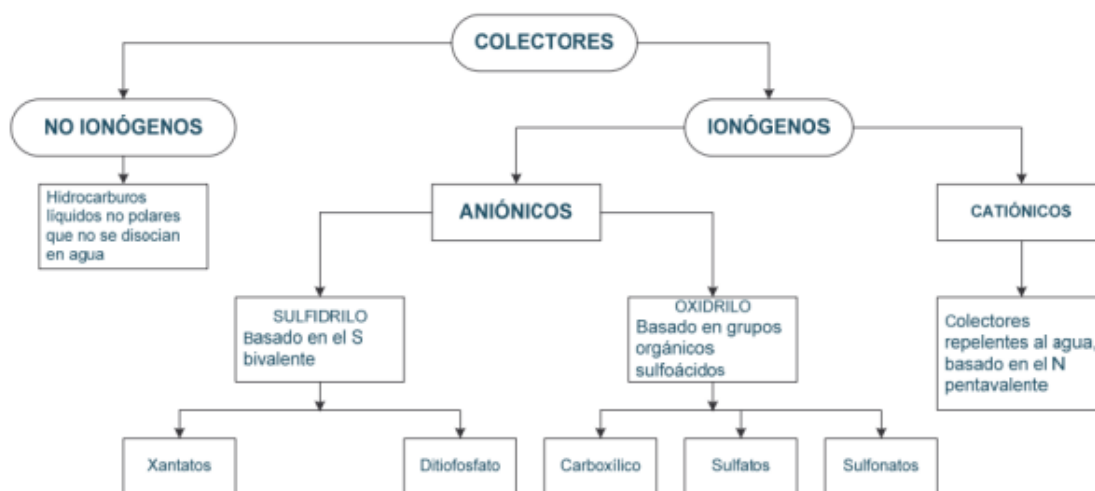
La distribución se basa de la disociación de un colector en agua, en la parte principal, o sea, el grupo polar con el radical, es un catión o un anión.

La formación de un anión junto al grupo polar los colectores se separan en su mayor parte, la solución dejando un catión que puede ser sodio, potasio, calcio o el mismo hidrógeno. Por otro lado, en otro lado las aminas se separan de modo que los radicales con nitrógeno (primario,

secundario, terciario y cuaternario) constituye el catión mientras que el anión es un hidroxilo. (Ver Figura N°7) (Linares Gutiérrez, 2009)

Figura 7

Clasificación de Colectore



Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P.39), por Linares, N. (2014).

Los reactivos se clasifican según su grupo apolar o su grupo polar. Sin embargo, se pudo comprobar, que el grupo apolar influye mucho más en la intensidad del colector que en las propiedades colectoras, eso indica que la estructura del grupo apolar dependerá de la fuerza de un colector, mientras en el grupo polar si es capaz o no de incorporarse al mineral y actuar como un colector. De esta manera es posible clasificar los colectores según su grupo polar. (Linares Gutiérrez, 2009)

a. Xantatos o Xantogenatos

Los xantatos son reactivos tiocarbonatos que son sales del ácido xántico donde se produce al reaccionar el alcohol con disulfuro de carbono y se produce de tres elementos:

- Bisulfuro de carbono (HS^-)
- Álcali (soda caustica) (MOH)
- Alcohol (etanol, metanol, etc.)

Son reactivos sólidos que están presentes como las sales alcalinas de sodio y potasio ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$) que son solubles en agua. Su variable más importante en los xantatos su longitud de la cadena carbonada R, que es una cadena normal o distribuida de distintos números de carbonos. Si la longitud de R aumenta, aumenta el poder colector del xantato (mayores recuperaciones) (Cabala, 2003)

Estos reactivos colectores tienen como finalidad una gran difusión debido al bajo costo, con fuertes propiedades colectoras y una buena selectividad, que son considerados como uno de los reactivos fundamentales para la flotación de minerales sulfurados no ferrosos y para metales nativos ($\text{Cu}, \text{Ag}, \text{Au}$) y en ciertos minerales oxidados, pero previamente sulfurizados. (Cabala, 2003)

2.2.4.10. Modificadores de pH.

Su eficiencia en los reactivos químicos de flotación dependerá de su grado de alcalinidad o acidez de la pulpa. Una de las variables fácilmente medibles en la flotación es el pH. Como es de conocimiento el agua está parcialmente ionizada en iones de H^+ y OH^- . El proceso de flotación

para alcalinizar generalmente se usa cal (CaO), hidróxido de sodio (NaOH). La cal es más barata, pero a veces tiene el inconveniente de flocular las pulpas. (Cabala, 2003)

Un proceso en que la modificación del pH alcanza una gran importancia practica es la depresión en la pirita en un circuito alcalino al flotar sulfuros de cobre o de otros metales. En circuito acido todos los sulfuros de cobre y la pirita flotan muy bien. Sin embargo, en circuito alcalino la pirita se deprime fuertemente, tal vez porque no oxida superficialmente. (Sutulov, 1993)

2.2.4.10.1. La Cal

El pH de la pulpa es un factor muy importante en procesamiento de mineral-flotación ya que esto regula la facilidad de formación de las películas e influye en la carga superficial del mineral. La flotación sólo es posible en una estrecha zona de valores de pH, de modo que en una variación grande de pH puede dar lugar a la inversión completa de la flotación. Por esta razón los reguladores de pH. (Ca(OH) NaOH. H₂SO₄. Na₂CO₃), pueden actuar tanto como activadores o como depresores según las condiciones. (Cabala, 2003)

La cal es un reactivo que permite regular la alcalinidad de la pulpa (regulador de pH), en forma de lechada de cal, que consiste en suspensión de partículas de hidróxido de calcio (CaOH) en una solución acuosa saturada cuyo aspecto físico en solido es polvo blanco y su composición química es oxido de calcio (CaO). (Hudbay, 2023)

2.2.4.11. Espumantes.

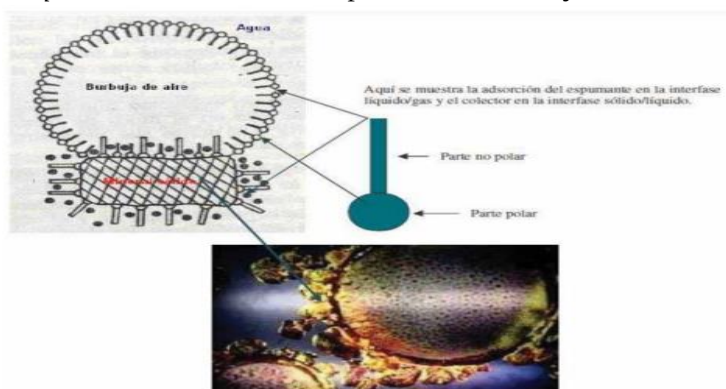
Los espumantes se consideradas tensoactivas heteropolares tienen facilidad de adsorberse en la superficie de la interfase agua-aire. Lo más importante de los espumantes es generar consistencia en las burbujas de aire, donde se evita la unión entre sí y en el momento de salir a la

superficie no revienten. Su polaridad del espumante se adsorbe a la superficie de la interfase agua/aire y la parte no polar va dirigido hacia el aire. (Linares Gutiérrez, 2009).

Son necesarios para evitar la unión de las burbujas de aire cuando llegan a la superficie del agua (lo que implicaría la destrucción de la espuma) manteniendo una espuma persistente que luego permite la separación del mineral flotado. Deben ser sustancias poco solubles y no ionizables que al concentrarse en las interfases aire-agua reduzcan la tensión superficial del agua. (Cabala, 2003)

Figura 8

Esquema de Adsorción de Espumante en Burbuja de Aire



Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P.51), por Linares, N. (2014).

2.2.4.12. Separación de Cobre-Plomo.

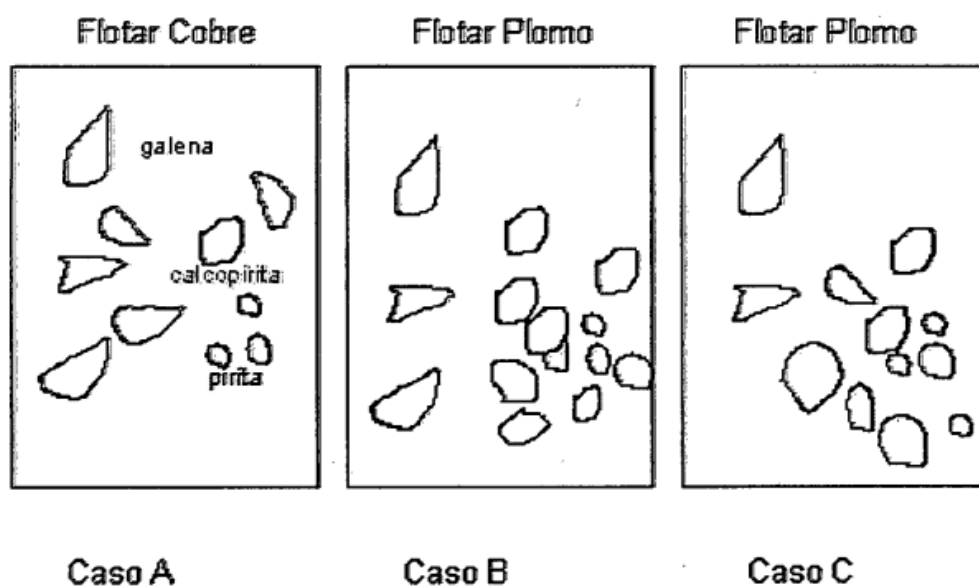
El principal problema de clasificación de los minerales de plomo de los de cobre tienen las características muy particulares debido a las diversas variedades de minerales de cobre, cuya distribución especial de sus átomos, composición química, tipo de cristalización, diseminación,

solubilidad, densidad, dureza, etc. Es totalmente diferente de un mineral a otro. En la siguiente Tabla N°1 se menciona los minerales de cobre más importantes.

La flotación selectiva plomo-cobre ya no es una problemática resuelta debido a las nuevas combinaciones de los reactivos, donde la pirita es un factor decisivo en determinar la estrategia de una flotación más adecuada y esto abre a una línea de instigación relevante en optimización de reactivos para una flotación selectiva. (Paraguay Garcia, 2018)

Figura 9:

Separación de Cobre- Plomo



Nota: Adaptada de Metalurgia II, (P.71), por Linares, N. (2014).

Cuando la cantidad de galena y la calcopirita son similares, la pirita en su mayor cantidad define el circuito para flotar plomo y pueda deprimirse el cobre junto a la pirita (Caso C). Cuando cantidad de galena es mayor que la suma de cobre y pirita (Caso A) se debe deprimir galena con Bicromato de sodio; técnicamente no hay más alternativas salvo la aplicación de gas SO_2 en reemplazo del Bicromato, siendo un proceso no detectado en la minería peruana. (Paraguay Garcia, 2018)

Tabla 1:

Minerales de Cobre

Nombre del Mineral	Fórmula Química
Bornita	Cu_2FeS
Bournita	PbCuSbS_3
Chalcosita	Cu_2S
Calcopirita	CuFeS_2
Covelita	CuS
Enargita	$3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{As}_2\text{S}_5$
Stannita	$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{FeS} \cdot \text{SnS}_2$
Tenantita	$\text{Cu}_8\text{As}_2\text{S}_7$
Tetrahedrita	$4\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$

Nota: Elaboración Propia

Un concentrado bulk, la separación de Pb del Cu se efectúa en varias etapas de limpieza para la depresión de plomo y flotación de cobre, esta selección dependera de la respuesta de los

minerales a ser separados y tipo de minerales de cobre y mucha abundancia relativa de los minerales de Cu-Pb.

2.2.4.13. Modificadores depresores.

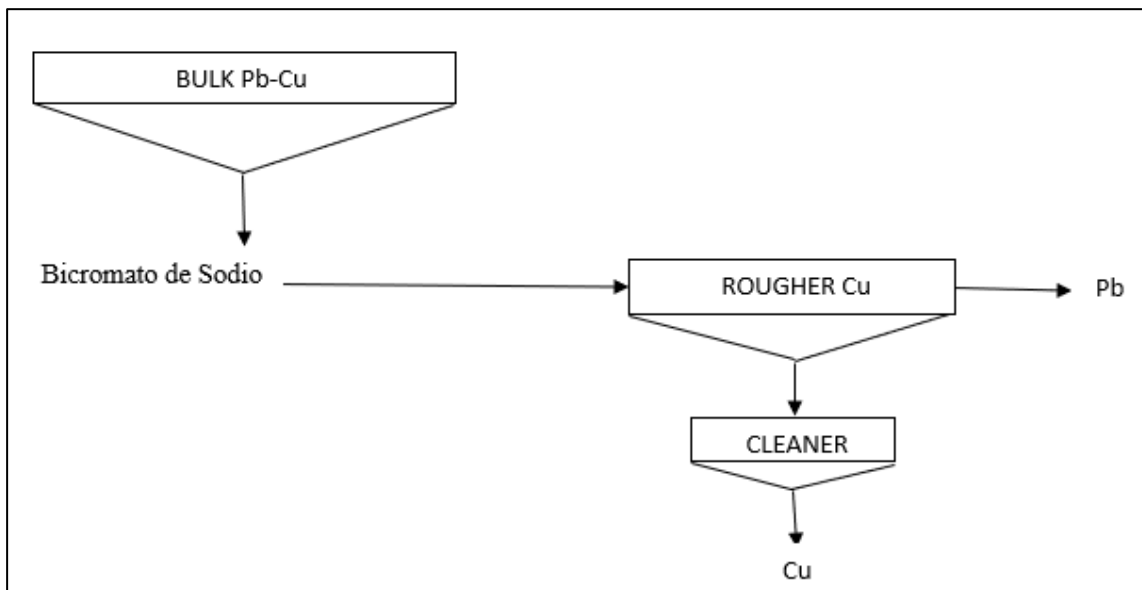
La función específica de los depresores es la de disminuir la flotabilidad de un mineral que no puede flotar haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores que pueden hidrofobizarlo. (Cabala, 2003)

2.2.4.13.1. Separación utilizando bicromato de sodio

En caso no hay alternativas de deprimir galena con bicromato de sodio y poder flotar valores de cobre, el esquema asumido hace más de 70 años fue el siguiente: (Cabala, 2003)

Figura 10:

Esquema de Separación de Cobre-Plomo



Nota: Adaptada de Metalurgia de Cobre, Cabala 2003.

El concentrado bulk de Pb-Cu es acondicionada en una solución de bicromato de sodio al 5% en cantidades aproximadas de 2 a 5 kilos de reactivo por una tonelada de bulk, posteriormente se hace una flotación de cobre (desbaste y limpiezas), en el proceso que se realiza el problema frecuente es que no se puede flotar menos de 10% de plomo utilizando el bicromato de sodio, en consecuencia, el concentrado de cobre no puede llegar a 23%Cu.es la realidad en la historia de la metalurgia en la separación Pb-Cu por el proceso de flotación. , no solo a nivel del Perú, sino a nivel mundial. (John, 2014)

2.2.4.14. Depresión de plomo.

La depresión de plomo se promueve cuando la cantidad de plomo en el concentrado de cobre se encuentra en mayor cantidad de cobre.

Para poder deprimir la galena se utiliza Bicromato de sodio (normalmente alrededor de 1000 gr/TM concentrado colectivo), donde se agrega al inicio del circuito de separación, también podemos utilizar en la pulpa del concentrado de cobre el gas SO₂(dióxido de azufre). (Tarazona Trujillo, 2012)

Factores que Influyen en Flotación de Minerales

- **Tamaño de burbujas:** La estabilidad y el tamaño de las burbujas es de mucha importancia en una celda de flotación, estas se consideran como medio transporte de minerales valiosos hasta la superficie.

- Tiempo de contacto: Se considera como el tiempo en que la partícula demora en separarse de alrededor de la superficie de la burbuja.
- Tiempo de Inducción: Es el tiempo necesario para que pueda penetrar la partícula del agua con el fin de adherirse a la burbuja.
- Cinética de flotación: La velocidad o cinética de flotación incrementa cuando aumenta la cantidad de burbujas, donde su hidrofobicidad de las partículas es mucho mayor.
- Fuerzas de separación de burbujas: Cuando se logra una adherencia de partículas valiosas a las burbujas están expuestas a fuerzas diferentes que provocan una separación o ruptura con la turbulencia de pulpa, la fuerza de la gravedad etc.

2.2.4.15. Etapas de Flotación

2.2.4.15.1. Flotación Rougher(Primaria).

La flotación rougher (primaria) es la primera etapa en flotación que se alimenta de la pulpa de los molinos, aquí se flota la mayor parte valiosa aun a costa de su selectividad utilizando concentraciones de reactivos (colectores, espumantes, activadores) pero en esta etapa solo se tiene concentrados provisionales, las espumas obtenidas no es un concentrado final porque aún contiene muchas impurezas que se eliminarán en la etapa de limpieza (cleaner). (Hudbay, 2023)

2.2.4.15.2. Flotación Cleaner

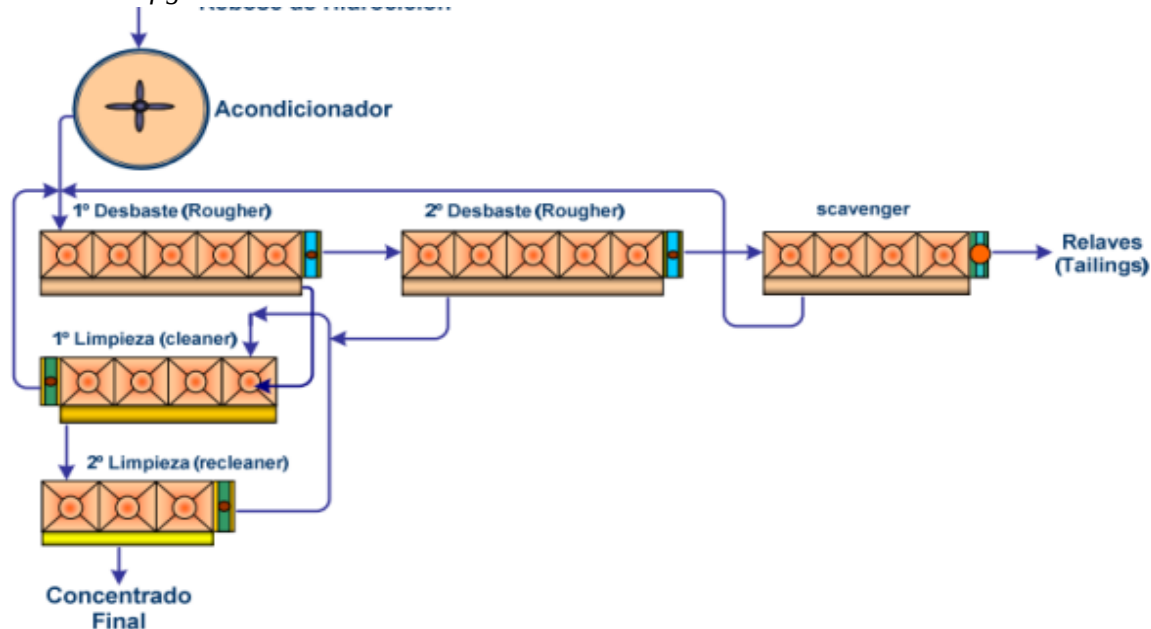
La flotación cleaner se limpia el concentrado proveniente de etapas previas y es la etapa final para la obtención de un concentrado bulk. El objetivo de la etapa de limpieza es obtener un

concentrado bulk limpio. Esto se logra eliminando las partículas no valiosas que fueron arrastradas hacia el concentrado en la flotación rougher y aprovechando la diferencia en las velocidades de flotación entre las partículas de alta ley y las partículas parcialmente liberadas (medios). En el proceso se cuenta con tres etapas de limpieza donde el concentrado de la primera limpieza alimenta a la segunda limpieza así sucesivamente hasta la tercera limpieza. (Hudbay, 2023)

En la tercera limpieza se utiliza las celdas columnas son muy apropiadas para esta aplicación debido a que permiten una alta selectividad por la altura de la columna y su mayor tiempo de residencia. Celdas mecánicas, de menor capacidad que las usadas en la etapa rougher, también se utilizan en la segunda primera y segunda limpieza. Trabaja con características de operación diferentes a las etapas de rougher y scavenger. (Hudbay, 2023)

2.2.4.15.3. Flotación cleaner scavenger

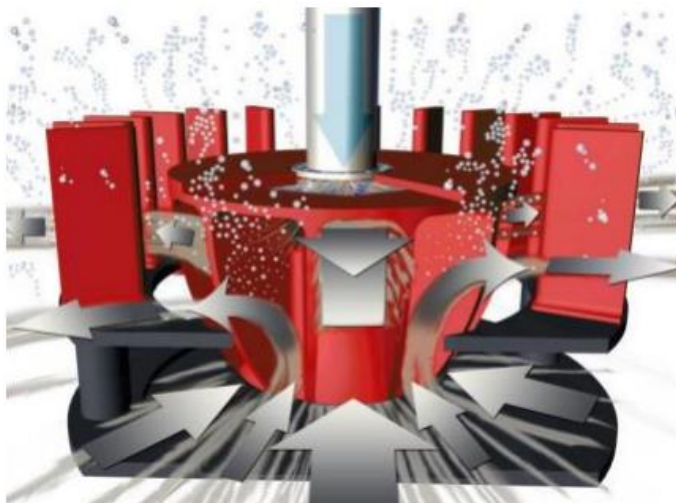
La flotación cleaner scavenger procesa las colas de la primera etapa de limpieza, el objetivo de esta etapa es la de producir una cola final y recuperar la parte valiosa que aún se encuentran en las colas, el concentrado cleaner scavenger contiene una alta proporción de partículas parcialmente liberadas (medios) estas partículas deben ser enviadas a remolienda. (Linares Gutiérrez, 2009)

Figura 11*Configuración de Circuito de Flotación Convencional*

Nota: Adaptada de Mineralurgia II, (P.10), por Linares, N. (2014).

2.2.4.16. Principios de Funcionamiento de Celdas de Flotación

El mecanismo del rotor es accionado por un motor eléctrico acoplado a un reductor, instalado en la parte superior del tanque, que proporciona mezclado y aireación. El rotor del agitador mecánico de la celda succiona pulpa desde la parte inferior de la celda, ascendiendo hasta el estator, con esto se logra mantener la pulpa en suspensión. El aire es alimentado uniformemente a la celda desde sopladores de aire externos a través del eje hueco del agitador mecánico y las ranuras verticales del rotor. A medida que el aire y la pulpa pasan a través del estator, el aire se dispersa en el tanque en pequeñas burbujas. Esta zona se denomina zona de mezcla. (Ver Figura N°12 y 13) (Linares Gutiérrez, 2009)

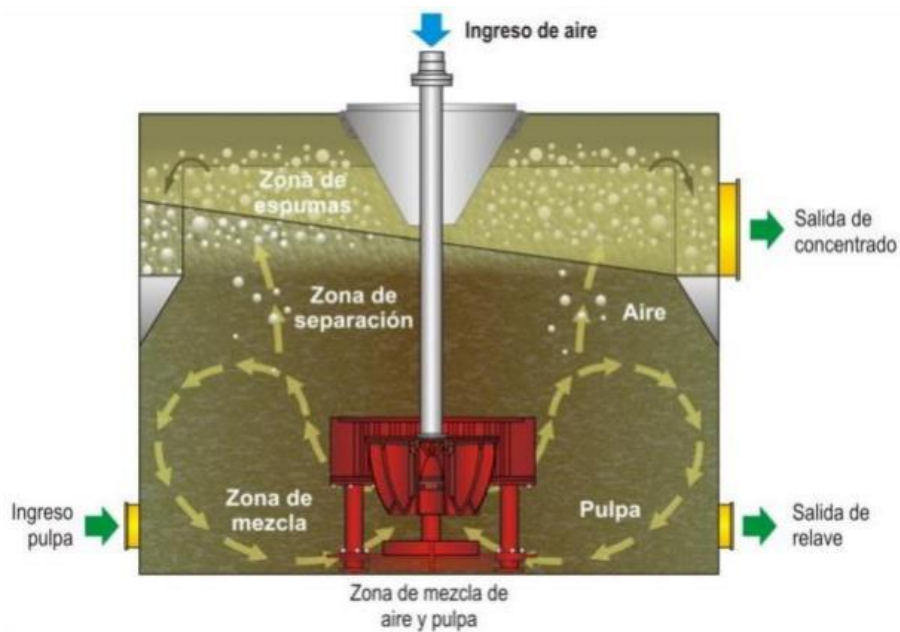
Figura 12*Funcionamiento de Celda de Flotación*

Nota: Adaptado de Manual de Operaciones- Hudbay 2023

Las burbujas creadas en la zona de mezcla ascienden a la zona de separación donde solo quedaran adheridas a las burbujas, el mineral valioso, mientras la cola queda en el fondo de la celda de flotación. Las burbujas continúan su ascenso hacia la zona de espumas en la parte superior de la celda. La forma cilíndrica del tanque mejora la dispersión del aire y favorece la estabilidad de las burbujas en la zona de espumas. (Linares Gutiérrez, 2009)

Figura 13

Principios de Funcionamientos de Partículas



Nota: Adaptado de Manual de Operaciones - Hudbay 2023

CAPITULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. HIPOTESIS

3.1.1. Hipótesis General

Deprimiendo el plomo con reactivos adecuados y específicos, se optimiza eficientemente la recuperación del concentrado de cobre de la Unidad Minera Constancia.

3.1.2. Hipótesis Específicos

- ✓ La granulometría adecuada para optimizar la recuperación del concentrado de cobre es de 60%-65%- malla200.
- ✓ La flotación selectiva para separar el cobre del plomo está entre un pH de 9 a 11.
- ✓ La dosificación adecuada de Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) optimiza la ley de concentrado final y recuperación de Cu.

3.2. VARIABLES

3.2.1. Identificación de Variables

3.2.1.1. *Variables Dependientes*

Recuperación de cobre

3.2.1.2. *Variables Independientes*

- ✓ Granulometría (%malla)
- ✓ pH
- ✓ Concentración de reactivo(g/Tn)

3.3. Indicadores

- P80(μm)
- Recuperación (%)
- Dosificación de reactivo (g/T)

3.4. Operacionalización de Variables.

Se muestra en la siguiente Tabla N° 2

Tabla 2:*Operacionalización de Variables*

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad	Instrumento
Recuperación de Cobre	Mide la eficacia con la que la planta concentradora recupera los minerales valiosos contenidos en el mineral alimentado. (Linares Gutiérrez, 2009)	Realizando la flotación bulk(Cu-Pb) y selectiva (deprimiendo el Pb). Donde se realiza balance metalúrgico para determinar la recuperación de cobre.	Cantidad de cobre recuperado	Porcentaje	%	Balance de materia. Uso de software Minitab 21.
Granulometría	Estudia el grado de liberación de las partículas. (Linares Gutiérrez, 2009, pág. 42)	Realizar las pruebas de análisis granulométrico mediante juego de mallas.	Determinar el % de malla apto para flotación.	Tamaño de granulometría en micrones	µm	Juego de tamices ASTM
pH	Es el logaritmo inverso a la concentración de Hidrogenes u oxidrilos en una disolución. (Sutulov, 1993, pág. 93)	Es la medición del grado de alcalinidad o acidez usando el peachimetro.	La escala de acidez y alcalino se considera de 0 a 14.	Concentración	Mol/L	Peachímetro
Concentración de reactivos	Es la cantidad en la que se encuentran las sustancias que se disuelven en relación a las sustancias que lo disuelven (Solvente) (Sutulov, 1993, págs. 67-111)	Es la fuerza de la concentración química con que actúa en una disolución, que es la cantidad de masa por unidad de volumen de cada reactivo.	Cantidad de concentración de Reactivo Especifico	Gramos por Tonelada Métrica.	g/T	Probetas y Fiola

Nota: Elaboración Propia

CAPITULO IV: METODOLOGIA

4.1. Tipo de Investigación

Esta investigación es de tipo cuantitativa experimental, de donde se inicia de conocimientos teóricos para convertirlos en aplicaciones industriales. (Zampieri, 2014)

4.2.Nivel de investigación

Esta investigación es de nivel descriptivo, donde se describe el problema de estudio y las alternativas de solución. También es de nivel explicativo, porque explica la relación existente de variables independientes con la dependiente. (Zampieri, 2014)

4.3.Método de investigación

En esta investigación se aplica el método deductivo, donde consideramos la conclusión del trabajo de investigación, esto nos indica que las conclusiones es consecuencia de los efectos de la variable dependiente, cuando ellas resultan verdaderas y tienen validez. Para nuestro caso, es el porcentaje de recuperación de cobre. (Zampieri, 2014)

4.4.Diseño de investigación

Esta investigación tiene un diseño experimental, donde podemos manipular más de una variable independiente para poder controlar el incremento o la disminución de ellas y el efecto respectivo. En esta investigación se hacen cambios en las variables independientes y determinar su efecto con la variable dependiente. El métodos experimental nos permiten poner a prueba la hipótesis de relaciones causales. En la presente investigación, las causas son: la granulometría, pH,

dosificación de Bicromato de Sodio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) y el efecto es el porcentaje de recuperación de cobre como consecuencia de estas variables. (Gonzales, 2006)

$$X \rightarrow Y$$

$$(Causa \rightarrow Efecto)$$

Donde:

- X: Variable independiente, (causa).
- Y: Variable dependiente, (efecto).

4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Técnicas e instrumentos para la recolección de datos como:

- Observación
- Conocimiento de cantidades muestrales tales como la media, varianza, desviación estándar, etc.
- Datos experimentales a nivel laboratorio
- Uso del Software Minitab 21.

4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para su análisis de datos de la tesis se utiliza las siguientes técnicas como:

- **Análisis Descriptivo:** Nos permite describir su comportamiento de la muestra en estudio mediante las tablas, gráficos, etc.
- **Análisis Explorativo:** Es parte de la interpretación de los datos para poder llegar a la gráfica final del comportamiento de las variables evaluadas.
- **Diseño Experimental:** Tiene un análisis de regresión y correlación lineal múltiple, mediante los softwares de programación: Software de Minitab 21.

4.7.Población y muestra de estudio.

- Población: Los minerales sulfurados de Unidad Minera Constancia (Tajo pampacancha)
- Muestra: 50kg de mineral representativo.

4.8.Materiales e instrumentos de investigación.

4.8.1. Materiales de investigación

- Software: Minitab 21.
- Bibliografía

4.8.2. Instrumentos y equipos de investigación

- Tamis ASTM
- Balanza Marcy
- Probeta

- Fiola
- Celda de flotación
- pHmetro digital.

4.9. Técnicas de Investigación

- Muestreo de Mineral. – Para el desarrollo de esta investigación, se realiza muestreo de mineral representativo de tajo pampa cancha, de la misma forma se realizó la actividad previa a las etapas de los procesos metalúrgicos. Todo esto con el fin obtener una granulometría optima de operación y su posterior análisis de pulpa.
- Trituración de Mineral. - En esta etapa de conminución del mineral se realizamos en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, en una chancadora de quijada para ser reducidos a tamaños inferiores de $\frac{1}{4}$ ", esto dependerá de la dureza del mineral a tratar, posteriormente es reducido por chancadora de rodillos hasta obtener una granulometría de 100%-m10Ty.
- Molienda de Mineral. – La molienda se realizamos en el Molino de Bolas mediante una operación de vía seca hasta obtener una granulometría adecuada (60%- malla 200)
- Flotación de Pulpa. – La Flotación se realiza a través de una celda de 4LT de capacidad, la flotación bulk se pudo obtener un concentrado de plomo-cobre, luego se realiza una separación de Cu deprimiendo el Pb para finalmente obtener un concentrado más limpio.

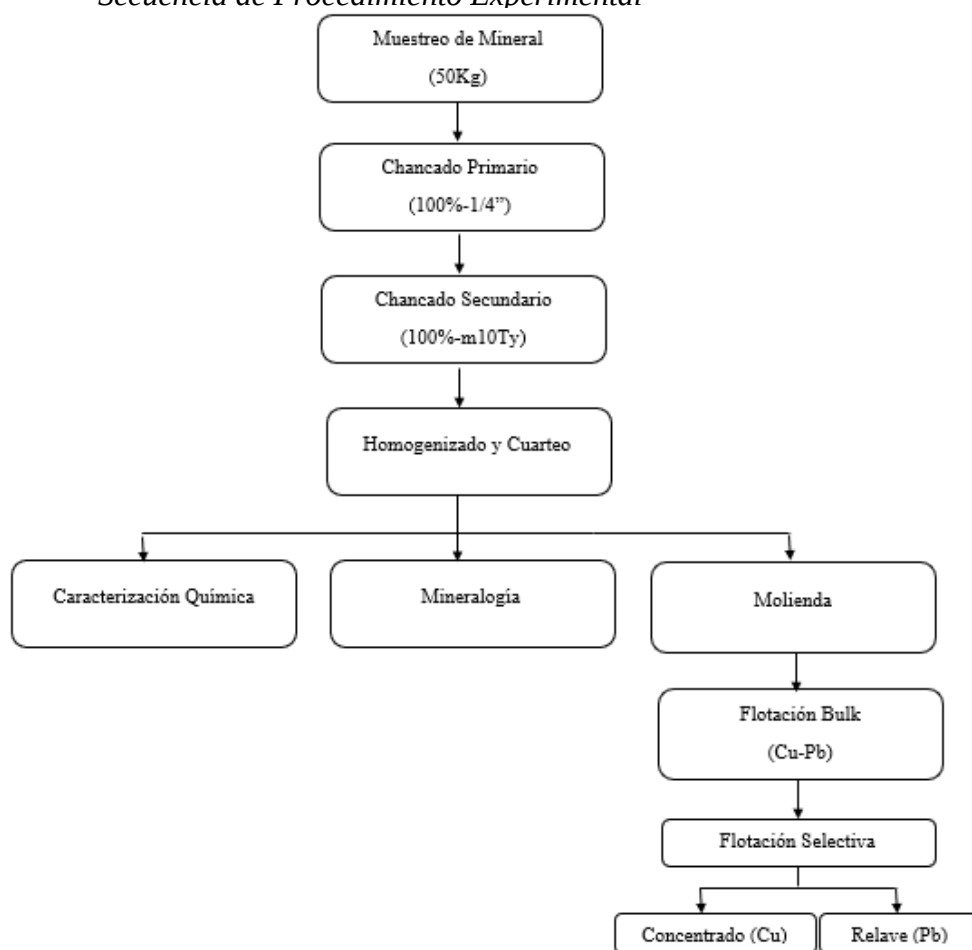
CAPITULO V: DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. Procedimiento Experimental

El desarrollo experimental de las diferentes etapas que se desarrollaran cada una de ellas se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 14

Secuencia de Procedimiento Experimental



Fuente: Adaptación Propia de la descripción del procedimiento experimental a nivel laboratorio

5.2. Preparación Mecánica de Minerales (Muestreo de mineral)

Para alcanzar un beneficio se debe realizar una reducción de mineral hasta un tamaño optimo, la conminución del mineral empieza con la etapa de chancado reduciendo el mineral valioso hasta un tamaño menor a 1/4”.

5.2.3. Chancado Primario y Secundario

La preparación mecánica se desarrolla en el Laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, en una Chancadora de Quijada y posteriormente en la Chancadora de Rodillos hasta obtener una granulometría de 100%-m10Ty.

5.2.4. Homogenizado y Cuarteo

Una vez obtenido una granulometría de 100%-m10Ty en las etapas anteriores, es necesario realizar el homogenizado usando la técnica muy usual y practico en donde se forma un cono dividido en cuatro partes iguales, tomando las fracciones opuestas hasta obtener 1kg de subproductos para su posterior análisis químico y mineralógico.

5.3. Análisis Químico de Cabeza y Caracterización de la Muestra del Mineral.

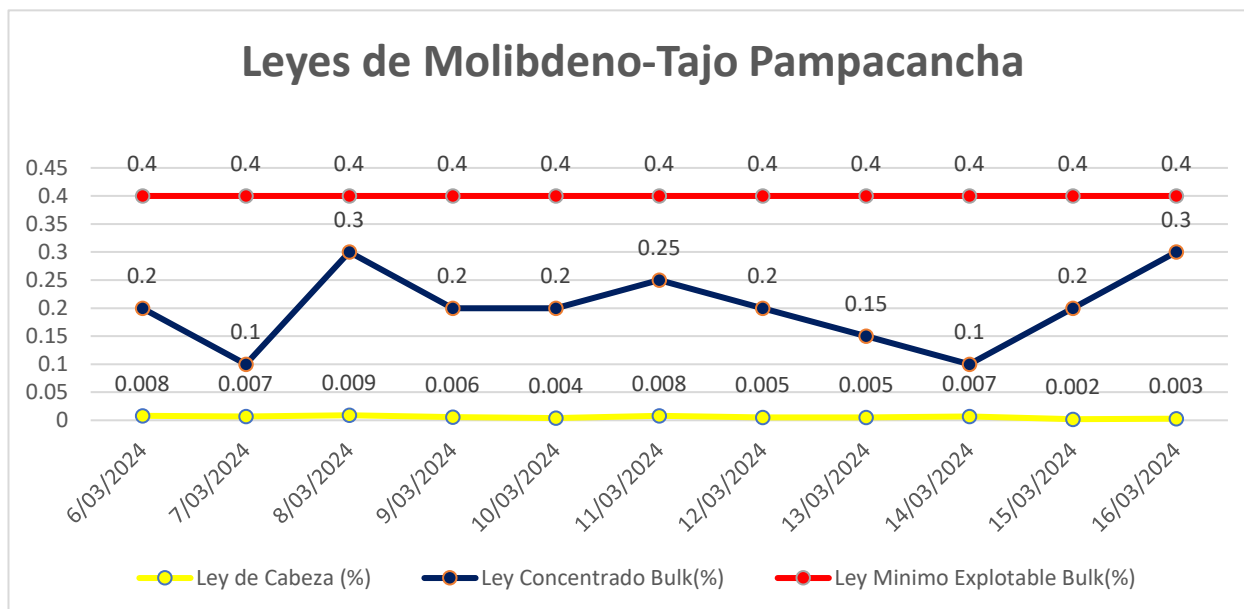
Para la realización de la parte experimental es importante conocer las leyes de cabeza del mineral para su estudio y la caracterización del mismo, para ello, se obtuvieron los siguientes resultados en el laboratorio CONTROL MINERALS S.A.C. ubicado en MZA.C LOTE. 8 APV. SAN FERNANDO-AREQUIPA-SOCABAYA, con RUC: 20607588997, con el fin de conseguir resultados verídicos de cada una de las muestras obtenidas en la prueba experimental.

Tabla 3:*Análisis Químico de mineral de cobre*

ANALISIS QUIMICO DE CABEZA	
Ley de Cobre	Ley de Plomo
Cu (%)	Pb (%)
1.20	8

Nota: Resultado de análisis química de cabeza, proporcionado por laboratorio de Control Minerals S.A.C.

La U.M. Constancia actualmente explota dos tajos: Constancia y Pampacancha, el tajo constancia principalmente contiene minerales de cobre de baja ley y molibdeno de ley explotable. En cambio, el tajo pampacancha contiene leyes altas de cobre y mínima cantidad de molibdeno (Ver Gráfico N°1). Para este proyecto de investigación se realizan muestreos de tajo pampacancha en donde hay presencia de galena, calcopirita, covelita y calcosita.

Gráfico 1: *Leyes de Molibdeno de Tajo Pampacancha*

Nota: Se muestra ley mínima explotable en el concentrado bulk de molibdeno, Fuente: Data PIVision Operaciones.

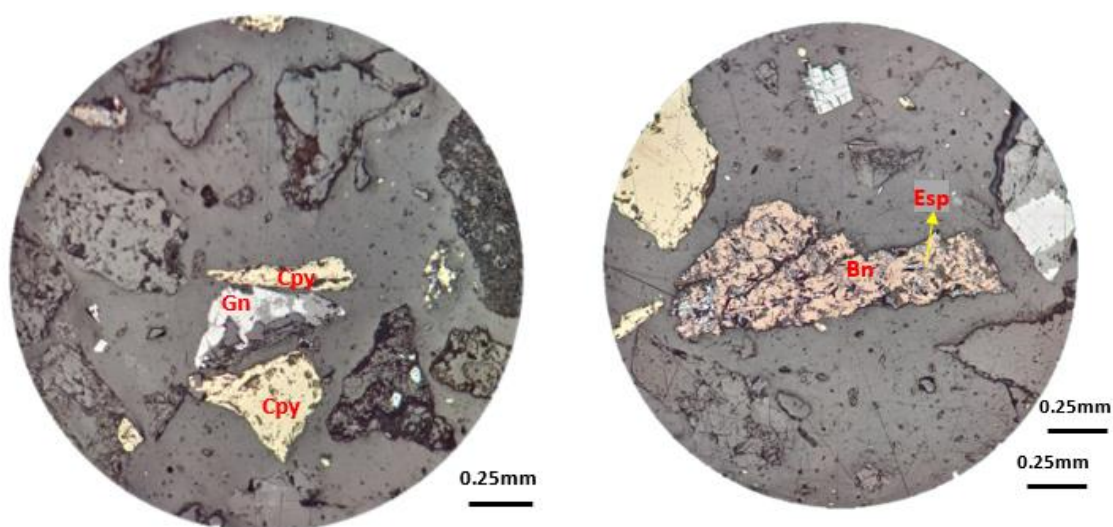
En el Grafico N°1, se muestra las leyes de tajo pampacancha, en donde la ley mínima explotable y rentable para sus procesos en planta de Molibdeno es 0.4% de Moly en concentrado Bulk, por lo que se demuestra que no alcanza a estos rangos de operación. En tal sentido, para el trabajo de investigación, no se realiza el análisis químico de cabeza del elemento molibdeno (Ver Tabla N°3).

5.3.1. Caracterización de Mineral de Cabeza.

Para hacer posible la caracterización visual de la muestra de mineral de cabeza, se toma una muestra de 250 gr a 80%-malla 200 Tyler, en donde se visualiza mineral de galena incrustada y asociados a la calcopirita

Imagen 1:

Análisis Mineralógico de la Muestra para el Estudio de Investigación



Fuente 1: Ing. Mauro Zegarra Carreón, visualización microscópica de galena incrustada y asociados a calcopirita.

5.4. Determinación de Gravedad Especifica

Para determinar la gravedad especifica se usa la técnica de la fiola, que conlleva los siguientes procedimientos:

W_m = Peso de Mineral

W_1 = Peso de Fiola + Agua

W_2 = Peso de Fiola + Agua + Mineral

Para determinar la gravedad especifica se desarrolla mediante la siguiente ecuación:

$$G.E. = \frac{W_m}{W_m + W_1 - W_2}$$

Tabla 4:

Determinación de Gravedad Especifica de la Muestra

N°	W _m	W ₁	W ₂	G.E.
Pruebas				
1	10	155.7	161.9	2.63
2	10	156.1	161.7	2.27
3	10	155.6	162.3	3.03
Promedio:				2.64

Nota: Elaboración propia

Con el resultado obtenido, se realiza la preparación de pulpa y establecer los pesos de mineral y agua para las pruebas experimentales de Flotación Bulk y Selectiva.

5.5. Moliendabilidad

Para una liberación optima de mineral a tratar se determinó el tiempo de moliendabilidad realizando seis pruebas en diferentes tiempos (10, 12, 15, 17,20 y 25 min) de molienda a partir de la muestra de cabeza preparado a 100%-m10Ty; en donde los productos de cada una de las pruebas fueron analizados granulométricamente con el objetivo de elaborar una curva de moliendabilidad.

Las pruebas se desarrollaron en el Laboratorio de Preparación Mecánica de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Tabla 5:

Diseño y Características del Molino de Bolas (Laboratorio)

Diseño del Equipo	
Longitud (")	13
Diámetro Interno (")	8
Volumen Interno (l)	10.71

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6:

Parámetros Operativos para la Operación de Molino de Bolas en el Laboratorio

Parte Operativa	
Velocidad Crítica (rpm)	27.07
Velocidad Operativa(rpm)	20.26
Carga del Mineral (Kg)	1
Peso Total (Kg)	10.46

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7:*Distribución de Medios Moledores*

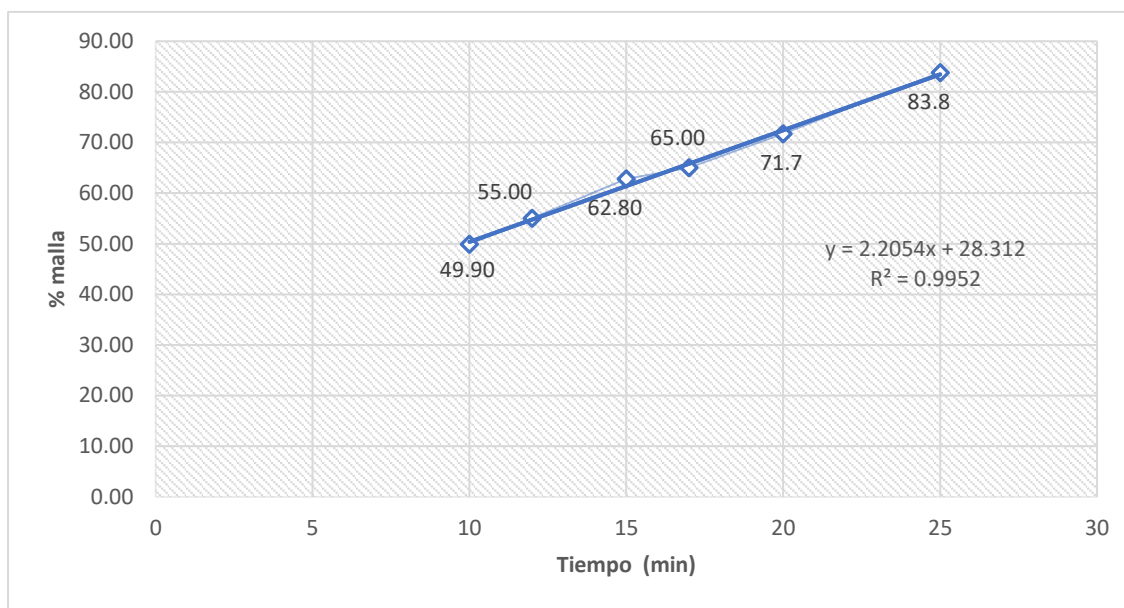
Distribución de Medios Moledores			
Cantidad de Bolas	Peso de Bolas Unitarias(g)		Diámetro (“)
31	67		1
37	227		1.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8:*Tiempo de Moliendabilidad*

N°	Tiempo(min)	Peso de Muestra(gr)	Retenido (%)	Pasante (%)
1	10	100	50.1	49.9
2	12	100	45	55
3	15	100	37.2	62.8
4	17	100	35	65
5	20	100	28.3	71.1
6	25	100	16.2	83.8

Nota: Elaboración propia

Gráfico 2: Distribución Granulométrica de Moliendabilidad

Nota: Elaboración propia

Distribución granulométrica de moliendabilidad y su ecuación matemática.

Para alcanzar una granulometría adecuada de 60-65% malla -200, de la ecuación se obtiene del gráfico, despejamos el valor de “x” y reemplazamos el valor de “y” por 60 y 65, de esta manera obtenemos el tiempo de molienda óptima y necesaria.

Tenemos la ecuación:

$$y = 2.2025x + 28.312$$

Despejando

$$x = \frac{y - 28.312}{2.2025}$$

Reemplazando “y” por 60

$$x = \frac{60 - 28.312}{2.2025}$$

$$x = 14.387$$

Reemplazando “y” por 65

$$x = \frac{65 - 28.312}{2.2025}$$

$$x = 16.657$$

Tabla 9:

Resultado de Tiempo de Molienda

%pasante(-200malla)	Tiempo (min)
60	14.387
65	16.657

Nota: Elaboración propia

Para poder llegar a una conminación deseada de 60-65% -200 malla, el tiempo de molienda necesaria es de 15 minutos con 50 segundos para el tipo de mineral que será procesado en laboratorio de procesamiento de minerales.

5.6. Distribución Granulométrica

La distribución granulométrica se realiza para tener un control metalúrgico, con el fin de conocer el tamaño promedio de partículas en peso y la realización del porcentaje pasante versus el tamaño de partículas.

5.6.1. Equipos y Materiales

- Juego de tamices ASTM
- Mineral 500gr (100%-10malla)
- Equipo de Ro-Tap del laboratorio Metalúrgico
- Espátula
- Brocha
- Bolsas Transparentes
- Cuaderno de Apuntes

5.6.2. Procedimiento

- ❖ Primeramente, realizar el pesado de mineral que es de 500 gr.
- ❖ Se prepara el juego de tamices a usar de tipo ASTM de mallas (16,20,28,48,65,120,150,200)
- ❖ Llenado de mineral a los tamices respectivos y encender el Ro-Tap durante 8 minutos.
- ❖ Se retira los tamices y pesamos el mineral retenido en cada tamiz o malla
- ❖ Realizamos el análisis de distribución granulométrica del mineral

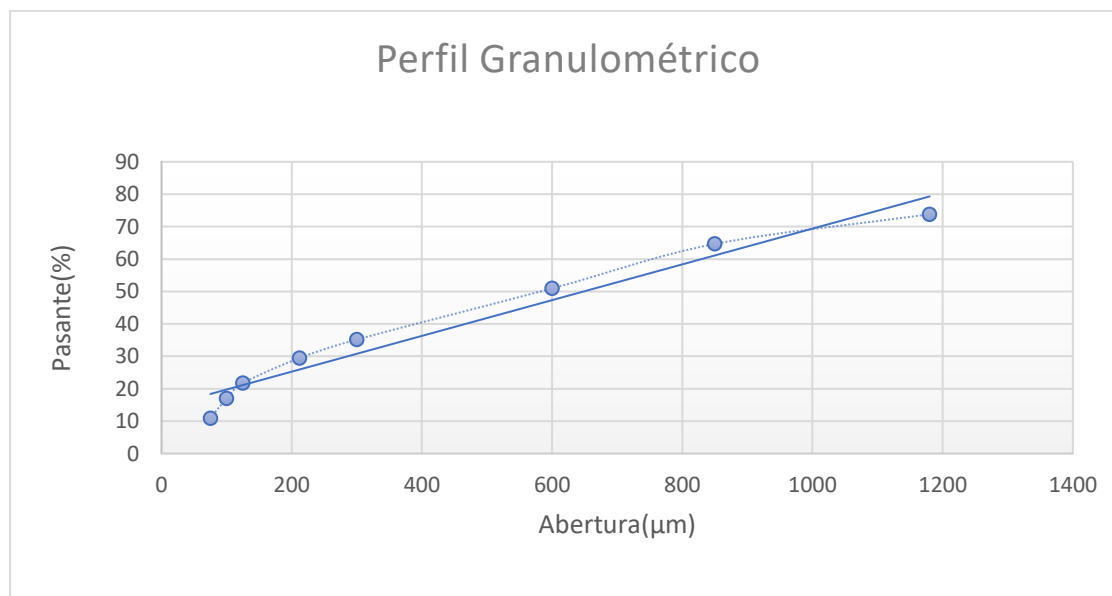
5.6.3. Resultados

En la siguiente Tabla N°10, se observa de distribución granulométrica.

Tabla 10:*Distribución Granulométrica*

Malla	Abertura ASTM (μm)	Peso(gr)	% En Peso	%Ac. Retenido	%Ac. Pasante
-10	1700	0	0	0	100
16	1180	130.5	26.19	26.19	73.81
20	850	45.6	9.15	35.34	64.66
28	600	68.3	13.71	49.05	50.95
48	300	78.6	15.78	64.83	35.17
65	212	28.4	5.7	70.53	29.47
120	125	38.5	7.73	78.26	21.74
150	100	23.6	4.74	83	17
200	75	30.4	6.1	89.1	10.9
-200	-75	54.3	10.9	100	0
TOTAL		498.2	100		

Nota: Elaboración propia, resultado de distribución granulométrica con juego de tamices

Gráfico 3:*Perfil Granulométrico*

Nota: Elaboración propia, la tendencia granulométrica para alcanzar una liberación adecuada.

De los resultados obtenidos del análisis granulométrico se puede visualizar que el 89.1 % de liberación se desarrolla en la malla 200.

5.7. Función de Matemática de GATES-GAUDIN-SCHUMANN(G-G-S)

Esta función se obtiene de relacionar los valores de porcentajes acumulados pasantes con el tamaño de partículas de malla de la serie utilizada. El modelo matemático propuesto es:

$$F(X) = 100 * \left[\frac{x}{x_o}\right]^m$$

Donde:

$F(X)$: % en peso acumulado pasante por cada malla:

x : Tamaño de partículas en micrones

x_o : Modulo de tamaño el cual indica el tamaño teórico máximo de partículas en la muestra

m : Módulo de distribución

Linealizando la ecuación se tiene:

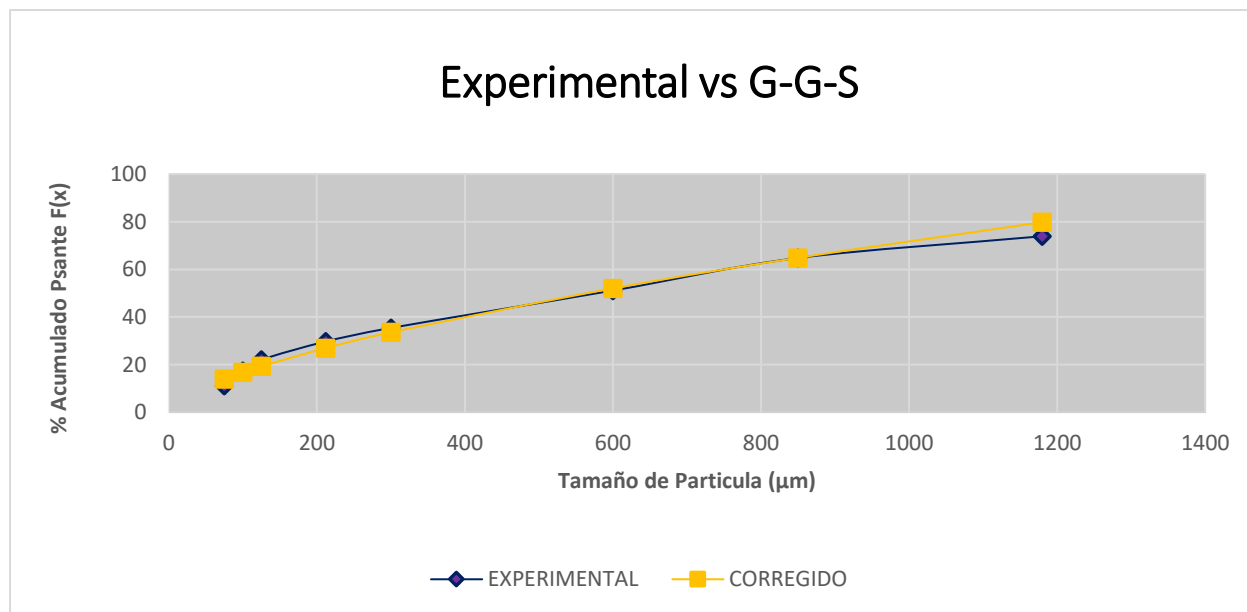
$$\text{Log}(F(x)) = \text{Log}\left(\frac{100}{x_o^m}\right) + m\text{Log}x$$

$$a = \text{Log} \frac{100}{x_o^m}$$

Tabla 11:*Cuadro de Resultados de Distribución Experimental y modelo G.G.S.*

Malla N°	Abertura (μm)	Peso (gr)	% Reten	%Retenido Acumulado	%Pasante Acumulado	log(x)	log(f(x))	x ²	XY	y ²	G-G-S
16	1180	130.5	26.1	26.1	73.9	3.0719	1.8686	9.44	5.74	3.49	79.792
20	850	45.6	9.12	35.22	64.78	2.9294	1.8114	8.58	5.31	3.28	64.843
28	600	68.3	13.66	48.88	51.12	2.7782	1.7086	7.72	4.75	2.92	52.024
48	300	78.6	15.72	64.6	35.4	2.4771	1.549	6.14	3.84	2.40	33.561
65	212	28.4	5.68	70.28	29.72	2.3263	1.473	5.41	3.43	2.17	26.945
120	125	38.5	7.7	77.98	22.02	2.0969	1.3428	4.40	2.82	1.80	19.292
150	100	23.6	4.72	82.7	17.3	2	1.238	4.00	2.48	1.53	16.753
200	75	30.4	6.08	88.78	11.22	1.8751	1.05	3.52	1.97	1.10	13.967
TOTAL						19.5549	12.0414	49.20	30.32	18.70	

Nota: Elaboración propia

Gráfico 4:*Distribución de Análisis Granulométrico Experimental vs G-G-S*

Nota: Elaboración propia

Los valores de las variables de la distribución se determinan por el método de los mínimos cuadrados, se define la siguiente relación.

$$m = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{\sum y - m \sum x}{N}$$

$$r = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Reemplazamos los valores obtenidos de la tabla en las ecuaciones mencionadas, se tiene lo siguiente:

$$m = \frac{8(30.32) - (19.5549)(12.0414)}{8(49.20) - (19.5549)^2}$$

$$m = 0.633$$

$$a = \frac{12.0414 - (0.633)(19.5549)}{8}$$

$$a = -0.042$$

$$r = \frac{8(30.32) - (19.5549)(12.0414)}{\sqrt{[8(49.20) - (19.5549)^2][8(18.70) - (12.0414)^2]}}$$

$$r = 0.987$$

De la ecuación N° determinamos el valor de x_o :

$$a = \text{Log} \frac{100}{x_o^m}$$

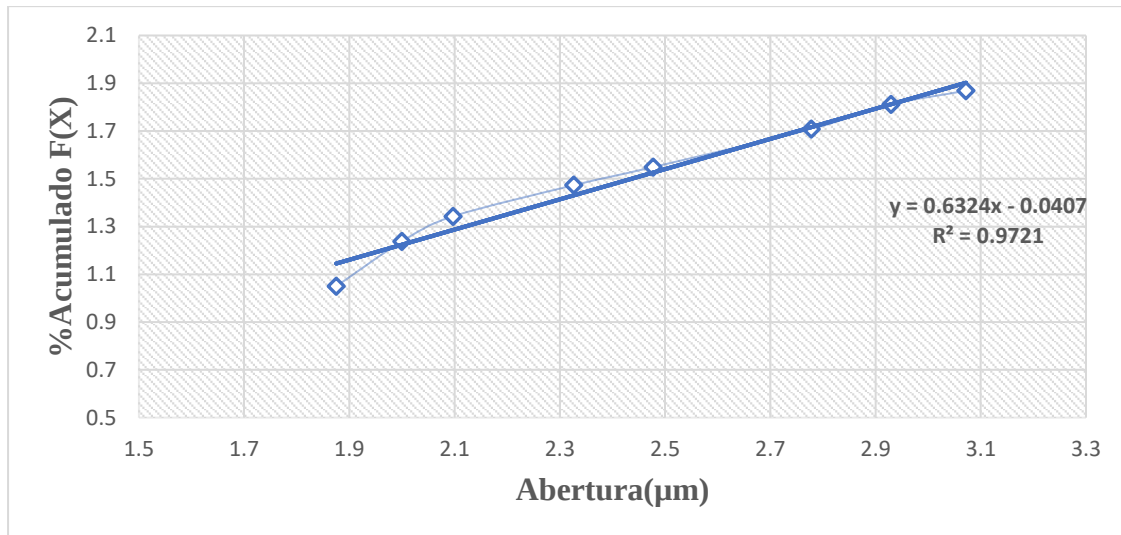
$$a = \log 100 - m \log x_o$$

$$-0.042 = 2 - (0.633) \log x_o$$

$$\log x_o = 3.225$$

$$x_o = 1678.804$$

Gráfico 5: Tendencia de F80



Nota: Elaboración propia

$$F80 = \left[\frac{80}{100} \right]^{\frac{1}{a}} * x_o$$

Los valores de a y b se obtiene de la gráfica F80 correspondiente, se tiene:

$$a=0.6324$$

$$b = -0.0407$$

$$x_o = \left[\frac{100}{10^{-b}} \right]^{\frac{1}{a}}$$

$$x_o = \left[\frac{100}{10^{-0.0407}} \right]^{\frac{1}{0.6324}}$$

$$x_o = 1685.58$$

Por lo tanto:

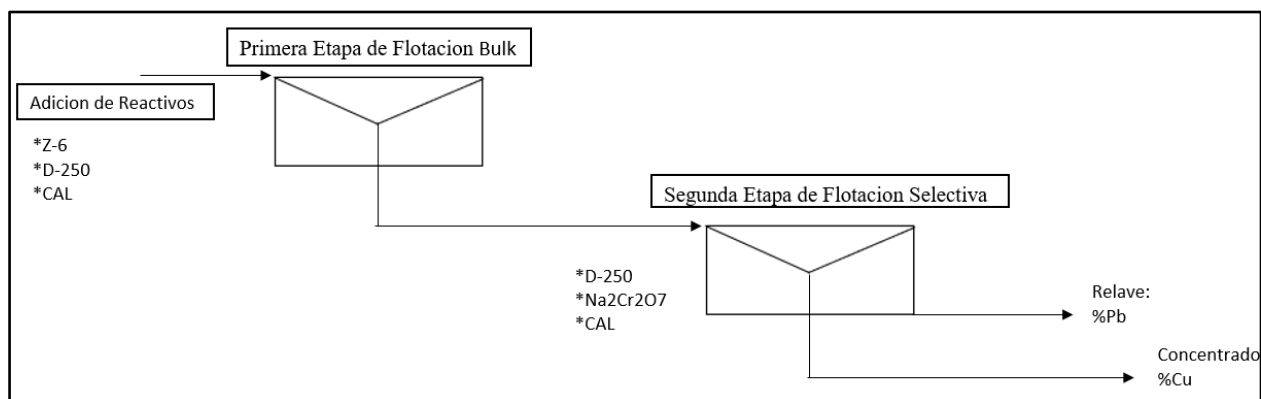
$$F80 = \left[\frac{80}{100} \right]^{\frac{1}{0.6324}} * 1685.58$$

$$\mathbf{F80 = 1184\mu m}$$

5.8. Desarrollo Experimental de Flotación Bulk

El desarrollo de las pruebas experimentales a nivel laboratorio se realiza en base a una muestra representativa y previamente analizada mineralógicamente como también los contenidos metálicos. En esta etapa se obtendrá un concentrado bulk con la dosificación de reactivos de colector como Xantato Amilico de Potasio(Z-6) y Dowfroat 250 como espumante, las dosificaciones están consideradas según a la experiencia y las condiciones operativas de planta concentradora Constanica.

Gráfico 6:Esquema de Pruebas de Corrida en Laboratorio



Nota: Elaboración propia

5.8.1. Materiales y Reactivos

5.8.1.1. Materiales

- ✚ Muestra de mineral representativa de U.M. Constanica
- ✚ Probetas de plástico de 1000 ml
- ✚ Picnómetro de vidrio 25ml

- + Fiolas de vidrio de 250, 500 ml
- + Luna de reloj de vidrio
- + Mortero de porcelana
- + Celdas de flotación Denver de 2 y 4 LT
- + Balanza analítica
- + Molino de bolas
- + Chancadora de quijada y cónica
- + Cuarteador de rifles
- + Mallas Tyler
- + Bandejas de plástico
- + Espátulas
- + Agua destilada
- + Jeringas de dosificación
- + Microscopia óptica

5.8.1.2. Reactivos

- + Z-6 (Colector)
- + Dowfroat250 (Espumante)
- + Bicromato de Sodio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

 Modificador de pH Ca(OH)_2

Tabla 12:

Condiciones de Trabajo en Laboratorio

Condiciones	Parámetros
Consumo de colector Z-6(ml/4lt)	2
Consumo de espumante Dowfroa 250 (gotas/4lt)	10
Revoluciones Rougher (RPM)	1200
Consumo de cal (gr)	1
pH de Flotación	9.5
Tiempo de Acondicionamiento(min)	1.5
Tiempo de Flotación Rougher (min)	4

Fuente: Elaboración Propia

5.8.2. Rango de Variables

El siguiente cuadro nos muestra el rango de las variables en unidades reales, se considera los valores centrales que representan aproximadamente los valores históricos a la aplicación en las operaciones industriales, la magnitud del rango es equidistante al punto central que tomamos representado el valor mínimo y máximo que son posibles valores para aplicar y estudiar lo necesario de las pruebas experimentales.

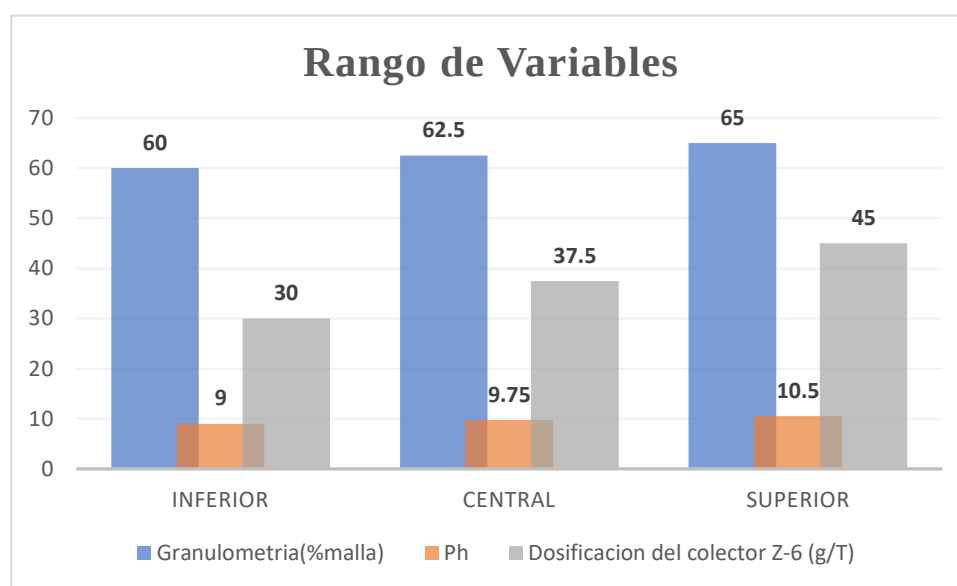
Tabla 13:

Rango de Variables

VARIABLES		NIVELES		
		Inferior	Central	Superior
X1	Granulometría (%malla)	60	62.5	65
X2	pH	9	9.75	10.5
X3	Colector Z-6 (g/T)	30	37.5	45

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 7: Grafica de Rango de Variables



Nota: Elaboración Propia

5.9. Plantilla de Diseño Experimental

Para la realización del diseño factorial completo se toma la matriz de diseño a escala codificada y natural, para las condiciones operativas del proceso tomamos como referencia esta matriz para una flotación polimetálica de bulk.

Tabla 14:

Plantilla de Diseño Experimental Codificada y Real

N°	ESCALA CODIFICADA			ESCALA NATURAL		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	1	-1	-1	60.0	9.0	30.0
2	1	1	-1	65.0	9.0	30.0
3	1	-1	-1	60.0	10.5	30.0
4	1	1	-1	65.0	10.5	30.0
5	-1	-1	1	60.0	9.0	45.0
6	-1	1	1	65.0	9.0	45.0
7	-1	-1	1	60.0	10.5	45.0
8	-1	1	1	65.0	10.5	45.0
9	0	0	0	62.5	9.75	37.5
10	0	0	0	62.5	9.75	37.5
11	0	0	0	62.5	9.75	37.5

Fuente: Elaboración Propia.

Procedimiento:

La parte experimental de flotación, se realiza de la siguiente manera:

- Pesar el mineral de cada malla de 60% y 65% a -200 malla de acuerdo a los cálculos determinados según a la capacidad de las celdas de flotación de laboratorio de procesamiento de minerales de E.P. Ingeniería Metalúrgica.

- Se realiza el cálculo de la cantidad de reactivos que serán dosificados en cada una de las pruebas para las disoluciones.
- Se prepara la pulpa en la probeta de 1000 cm^3 para una capacidad de 4Lt de flotación colectiva según a los parámetros necesarios de la flotación.
- Adicionamos la pulpa preparada a la celda de flotación para un condicionamiento reactivos de colector y pH durante 4 minutos.
- Adicionamos reactivos acordes a las dosificaciones de las celdas de flotación.
- El aire se inyectamos a las celdas de flotación para poder formar las burbujas hasta llegar a los 1200 RPM posteriormente adicionamos el espumante y flotamos en el tiempo establecido.
- Las burbujas mineralizadas y cargadas se separan de manera manual utilizando una paleta a un recipiente llamado bandeja respectiva.
- El concentrado y relave de cada prueba obtenida es enviada a un laboratorio para su respectivo análisis químico.
- Realizar el balance metalúrgico de todo el proceso.

5.10. Preparación de pulpas para la flotación Colectiva de minerales

Para la flotación de mineral se realiza se prepara la pulpa por cada prueba a realizar correspondiente en donde se utilizó una probeta de 4Lt, en donde se agregaron 1612.5 gr de mineral y 3387 ml de agua obteniendo una pulpa con densidad de 1250gr/L, esta densidad fue tomada según a las condiciones operativas de Planta Concentradora Constancia. La pulpa obtenida se vierte a la celda de flotación para las pruebas correspondientes.

Imagen 2:

Preparación de Pulpa



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15:

Preparación de Pulpas

Pulpa para Flotación	Densidad(gr/L)	1250
	%Sólidos	32
	Dilución (PI/Ps)	1.80
	Gravedad Específica	2.64

Nota: Elaboración Propia

5.11. Dosificación de Reactivos

La dosificación para la flotación colectiva y selectiva se realiza dando las condiciones operativas de Planta Concentradora Constancia y a nivel de experiencia, también a la información obtenida durante el estudio de experimentación. Esta dosificación se realiza en miligramos por minuto.

Imagen 3:

Dosificación de reactivos



Nota: Elaboración Propia

5.11.1. Cálculo de Consumo de Reactivo para Prueba de Flotación

Tabla 16:

Consumo de Reactivos para las Pruebas

Reactivos	Pureza (%)	Densidad (gr/cm3)	Flujo (ml/min)
Z-6	10	-	700
Dowfroat 250	-	0.98	350

Fuente: Elaboración Propia

Por ende, se realizan los siguientes cálculos:

Z-6=700ml/min

Dowfroat 250=350ml/min

Los cálculos de dosificación de reactivos se realizan con la siguiente ecuación matemática:

$$X = \frac{f * d}{w}$$

Donde:

f: Factor de la potencia

d: densidad del reactivo

w: peso del mineral (TM)

Cálculo de consumo de colector Z-6:

$$X = \frac{700ml}{min} * 0.10 * \frac{60min}{1hr} * \frac{1hr}{1875TM} = 2.24gr/TM$$

$$X = 1612.5gr * \frac{2.24gr}{10^6gr} * \frac{100ml(sol)}{5grZ - 6} = 0.072mlZ - 6$$

Cálculo de consumo de reactivo Dowfroa 250:

$$X = \frac{350ml}{min} * \frac{0.98gr}{cm^3} * \frac{60min}{1hr} * \frac{1hr}{1875TM} = 10.9gr/TM$$

$$X = 1612.5gr * \frac{10.9gr}{10^6} = 0.017ml DF - 250$$

Tabla 17:

Dosificación de Reactivos

Reactivos	Dosificación
Colector Z-6 (ml)	0.072
Dowfroa 250 (ml)	0.017
Cal (gr)	0.5

Fuente: Elaboración Propia

5.12. Parámetros de Operación para las Pruebas de Flotación

Las pruebas de flotación a nivel laboratorio en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica se realizan en base a los parámetros de operación tomadas a nivel industrial que serían convenientes para mejorar y llegar a los objetivos planteadas en este proyecto.

En metalurgia y tratamiento de minerales en plantas concentradoras es relevante llegar a la liberación adecuada de las partículas, de esto va depender la recuperación efectiva del mineral.

Tabla 18:*Parámetros de Operación para Granulometría*

Granulometría (%)	60%-200malla	65%-200malla
Tiempo de Molienda (min)	14.387	16.657

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19:*Parámetros de Operación*

PARAMETRO	VALOR
Celda de Flotación (L)	4
Gravedad Especifica	2.64
Densidad de Pulpa (g/l)	1250
Revolución de Flotación (RPM)	1200
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1000
Peso de Mineral (g)	1612.5
Agua (ml)	3387
% sólidos	32
Ph	9-10.5
Colector Z-6 (g/Ton)	30,45
Acondicionamiento (min)	4

Fuente: Elaboración Propia

Evaluación de las pruebas de flotación preliminar mediante la siguiente ecuación matemática:

$$K = \frac{G.E. - 1}{G.E.}$$

$$\%S = \frac{(w - 1000) * 100\%}{wk}$$

$$Ws = \frac{w * \%s}{100}$$

Donde:

K: constante del mineral

W: densidad de la pulpa

Ws: peso del mineral

G.E.: Gravedad específica

Calculando K:

$$K = \frac{2.64 - 1}{2.64}$$

$$K = 0.62$$

Calculamos el porcentaje de sólidos (%S):

$$\%S = \frac{(1250 - 1000) * 100}{1250 * 0.62}$$

$$\%S = 32.25\%$$

Calculamos el peso de mineral (W_s):

$$W_s = \frac{1250 * 32.25}{100}$$

$$W_s = 403.12g$$

Para 4Lt de capacidad de celda de flotación: **$W_s=1612.5$ g** de mineral

Calculamos el volumen del agua (V_{agua}):

$$V_{agua} = \frac{w(100 - \%S)}{100}$$

$$V_{agua} = \frac{1250(100 - 32.25)}{100}$$

$$V_{agua} = 846.8ml$$

Para 4Lt de capacidad de celda de flotación: **$V_{agua}= 3387$ ml** de volumen de agua

Imagen 4:

Muestras de Mineral



Fuente: Elaboración Propia

5.13. Pruebas de Experimentación de Flotación Bulk en laboratorio de Procesamiento de Minerales de E.P. Ingeniería Metalúrgica.

Prueba de Flotación N°1:

La prueba se realiza bajo los siguientes parámetros operativas:

Tabla 20:

Dosificación y Condiciones dadas para la Flotación Bulk Prueba N°1

Molienda	
Granulometría %	60%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	30
pH	9
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotación (RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroa 250 (gr/Ton)	8
Tiempo de Acondicionamiento (min)	4

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 21:*Balance Metalúrgico para la Flotación Bulk Prueba N°1*

PRUEBA 1					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	114.12	15.38	17.55	90.71	14.13
RELAVE	1498.38	0.12	1.80	9.29	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°2:**Tabla 22:***Condiciones operativas para la Flotación Bulk Prueba N°2*

Molienda	
Granulometría %	65%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	30
pH	9
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotación (RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroa 250 (gr/Ton)	8
Tiempo de Acondicionamiento (min)	4
Fuente: Elaboración Propia	

Tabla 23:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk Prueba N°2*

PRUEBA 2					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	103.72	16.62	17.24	89.09	15.55
RELAVE	1508.78	0.14	2.11	10.92	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°3:**Tabla 24:***Condiciones Operativas para la Flotación Bulk Prueba N°3.*

Molienda	
Granulometría %	60%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	30
pH	10.5
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotacion(RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroat 250 (gr/Ton)	8

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25:

Balance Metalúrgico Prueba N°3

PRUEBA 3					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	119.00	14.88	17.71	91.51	13.55
RELAVE	1493.50	0.11	1.64	8.49	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°4:

Tabla 26:

Condiciones Operativas Para la Flotación Bulk Prueba N°4

Molienda	
Granulometría %	65%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	30
pH	10.5
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotacion(RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroa 250 (gr/Ton)	8
Tiempo de Acondicionamiento (min)	4

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27:*Balance Metalúrgico de Prueba N°4*

PRUEBA 4					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	116.01	15.39	17.85	92.27	13.90
RELAVE	1496.49	0.10	1.50	7.73	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°5:**Tabla 28:***Condiciones Operativas para la Prueba N°5*

Molienda	
Granulometría %	60%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	45
pH	9
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotacion(RPM)	1200
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1000
% solidos	32
Dowfroa 250 (gr/Ton)	8
Tiempo de Acondicionamiento (min)	4

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29:*Balance Metalúrgico de Prueba N°5*

PRUEBA 5					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	115.48	15.20	17.55	90.71	13.96
RELAVE	1497.02	0.12	1.80	9.28	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°6:**Tabla 30:***Condiciones Operativas para la Prueba N°6*

Molienda	
Granulometría %	65%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	45
pH	9
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotación (RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroat 250 (gr/Ton)	8
Fuente: Elaboración Propia	

Tabla 31:*Balance Metalúrgico de la Prueba N°6*

PRUEBA 6					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	149.93	11.54	17.30	89.42	10.76
RELAVE	1462.57	0.14	2.05	10.58	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°7:**Tabla 32:***Condiciones Operativas para la Prueba N°7*

Molienda	
Granulometría %	60%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	45
pH	10.50
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotacion(RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroa 250 (gr/Ton)	8

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33:*Balance Metalúrgico de la Prueba N°7*

PRUEBA 7					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	132.01	13.20	17.43	90.05	12.21
RELAVE	1480.49	0.13	1.92	9.95	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°8:**Tabla 34:***Condiciones Operativas para la Prueba N°8*

Molienda	
Granulometría %	65%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	45
pH	10.50
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotacion(RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroat 250 (gr/Ton)	8
Fuente: Elaboración Propia	

Tabla 35:*Balance Metalúrgico de la Prueba N°8*

PRUEBA 8					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	136.65	12.54	17.14	88.56	11.80
RELAVE	1475.85	0.15	2.21	11.44	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°9:**Tabla 36:***Condiciones Operativas para la Prueba N°9*

Molienda	
Granulometría %	62.5%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	37.5
pH	9.75
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotacion(RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroat 250 (gr/Ton)	8

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37:*Balance Metalúrgico de la Prueba N°9*

PRUEBA 9					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	116.10	15.12	17.55	90.72	13.89
RELAVE	1496.40	0.12	1.80	9.28	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°10:**Tabla 38:***Condiciones Operativas para la Prueba N°10*

Molienda	
Granulometría %	62.5%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	37.5
pH	9.75
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotación (RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroa 250 (gr/Ton)	8
Tiempo de Acondicionamiento (min)	4

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 39:*Balance Metalúrgico de la Prueba N°10*

PRUEBA 10					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	114.58	15.45	17.70	91.49	14.07
RELAVE	1497.92	0.11	1.65	8.52	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°11:**Tabla 40:***Condiciones Operativas para la Prueba N°11*

Molienda	
Granulometría %	62.5%-200malla
Colector Z-6 (g/Ton)	37.5
pH	9.75
Flotación	
Densidad de Pulpa (g/t)	1250
Flotacion(RPM)	1500
Tiempo de Flotación (min)	6
Acondicionamiento (RPM)	1200
% solidos	32
Dowfroat 250 (gr/Ton)	8

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 41:*Balance Metalúrgico de la Prueba N°11*

PRUEBA 11					
PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	1.20	19.35	100.00	
CONCENTRADO	111.52	15.87	17.70	91.46	14.46
RELAVE	1500.98	0.11	1.65	8.53	

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla N°42, muestra los resultados que se obtuvo en la primera etapa de flotación (bulk) con ello podemos determinar el flujo masico recuperado en esta etapa, lo cual es la recuperación de Cobre.

Tabla 42:*Tabla de Resumen de Recuperaciones en las Pruebas Rougher (Flotación Bulk)*

N° Pruebas	Granulometría (%malla)	pH	Dosificación de Colector(g/T)	% Recuperación Cu
1	60	9	30	90.71
2	65	9	30	89.09
3	60	10.5	30	91.51
4	65	10.5	30	92.27
5	60	9	45	90.71
6	65	9	45	89.42
7	60	10.5	45	90.05
8	65	10.5	45	88.56
9	62.5	9.75	37.5	90.72
10	62.5	9.75	37.5	91.49
11	62.5	9.75	37.5	91.46

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla N°43, se muestra el nivel de significancia de los resultados obtenidos, que claramente el R-Cuadrado está por encima de 97% de efectividad, según al análisis desde el punto de vista estadístico.

Tabla 43:

Resumen y Significancia del Modelo Estadístico

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.437	97.14%	85.69%	44.56%

Fuente: Minitab 21

Tabla 44:

Análisis de Varianza

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F
Modelo	8	12.9096	1.6137	8.48
Lineal	4	6.1729	1.5432	8.11
Granulometria(%malla)	1	1.6562	1.6562	8.71
Ph	1	0.7564	0.7564	3.98
Dosificacion del colector(g/T)	1	2.9282	2.9282	15.39
Dosificacion del Espumante(g/T)	1	0.8321	0.8321	4.37
Interacciones de 2 términos	3	4.8361	1.6120	8.47
Granulometria(%malla)*Ph	1	0.5940	0.5940	3.12
Granulometria(%malla)*Dosificacion del colector(g/T)	1	0.4608	0.4608	2.42
Granulometria(%malla)*Dosificacion del Espumante(g/T)	1	3.7813	3.7813	19.88
Curvatura	1	1.9006	1.9006	9.99
Error	2	0.3805	0.1902	
Total	10	13.2901		

Fuente	Valor p
Modelo	0.110
Lineal	0.113
Granulometria(%malla)	0.098
Ph	0.184
Dosificacion del colector(g/T)	0.059
Dosificacion del Espumante(g/T)	0.172
Interacciones de 2 términos	0.107
Granulometria(%malla)*Ph	0.219
Granulometria(%malla)*Dosificacion del colector(g/T)	0.260
Granulometria(%malla)*Dosificacion del Espumante(g/T)	0.047
Curvatura	0.087
Error	
Total	

Nota: Elaboración en Minitab 21

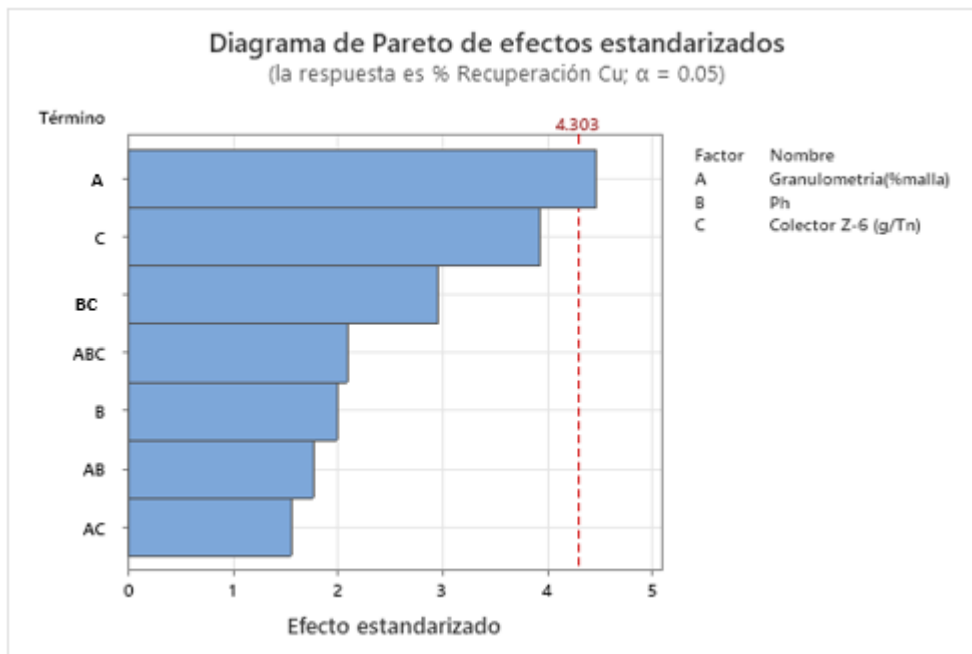
Tabla 45:*Ecuación de Regresión en Unidades no Codificadas***Ecuación de regresión en unidades no codificadas**

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Recuperación Cu} = & 103.8 - 0.215 \text{ Granulometria}(\% \text{ malla}) - 8.67 \text{ Ph} \\
 & + 0.719 \text{ Dosificacion del colector(g/T)} \\
 & + 4.82 \text{ Dosificacion del Espumante(g/T)} + 0.1453 \text{ Granulometria}(\% \text{ malla}) * \text{Ph} \\
 & - 0.01280 \text{ Granulometria}(\% \text{ malla}) * \text{Dosificacion del colector(g/T)} \\
 & - 0.0786 \text{ Granulometria}(\% \text{ malla}) * \text{Dosificacion del Espumante(g/T)} \\
 & + 0.933 \text{ Pt Ctral}
 \end{aligned}$$

Nota: Ecuación de Represión para determinar el % de Recuperación

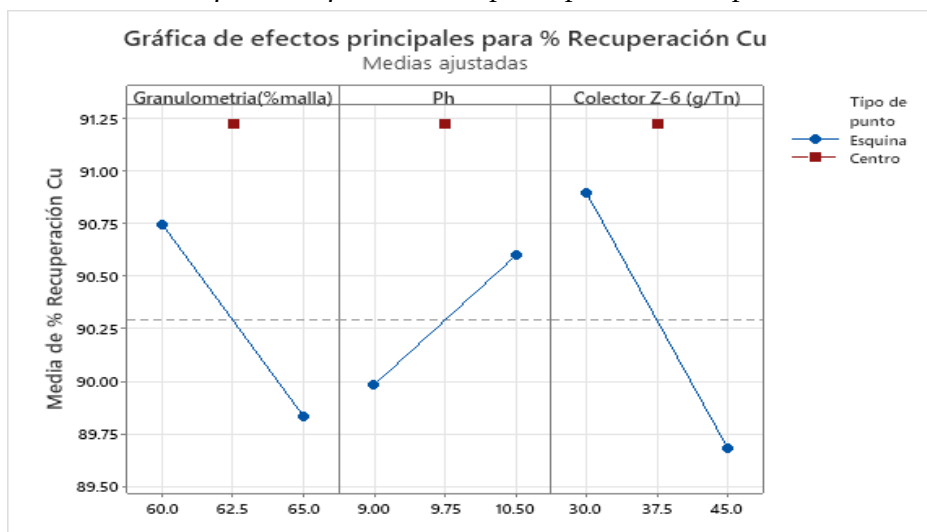
En el siguiente gráfico de diagrama de Pareto N°8, se puede observar el grado de significancia de cada variable independiente, en donde el más efectivo es la variable A: Granulometría, seguidamente de C: Colector (Z-6) y la combinación de BC: pH y colector respectivamente. Para este análisis se tomará en cuenta las dos primeras variables, según al diagrama.

Gráfico 8:Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados



Nota: A: Granulometría(%malla), B: pH, C: Colector Z-6 (g/Tn), Elaborado en Minitab 21

Gráfico 9:Gráfica de Efectos Principales para % Recuperación

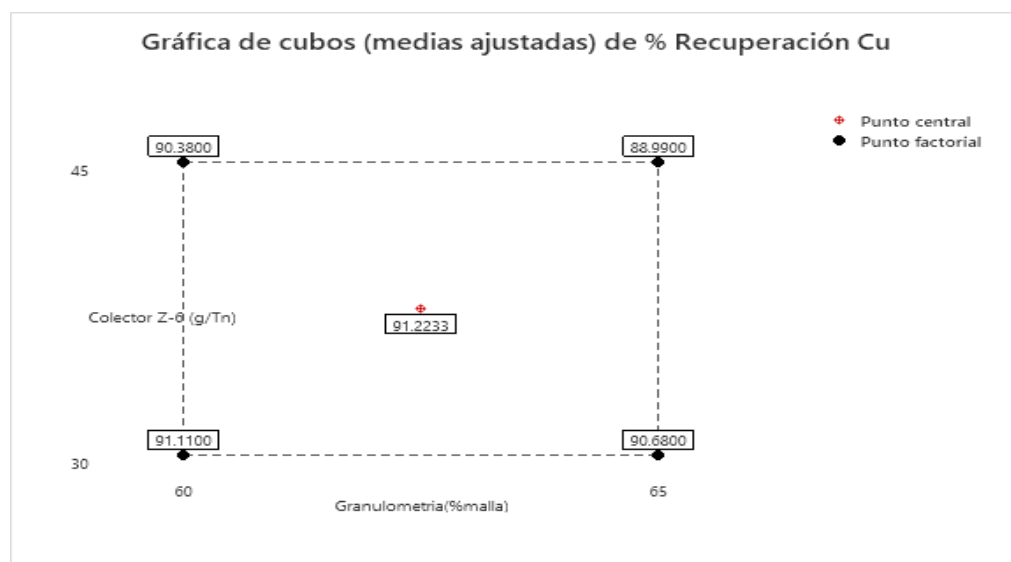


Nota: % de recuperación en función de variables como: Granulometría(%mala), pH, Colector. Realizado en Minitab 21.

El gráfico N°9, muestra los efectos individuales de cada variable en donde:

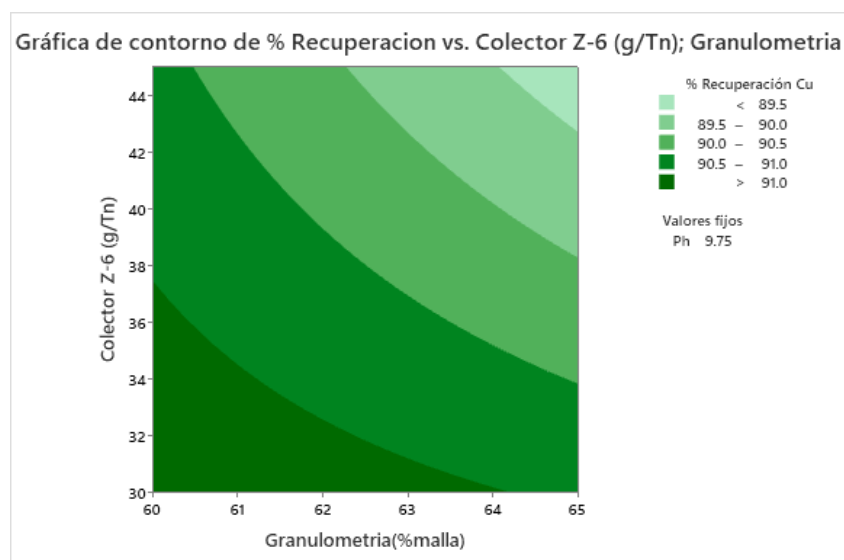
- Factor A: Este pendiente más pronunciada, nos indica que es la más influyente que cuando la granulometría esta entre 60-65%-malla200 la recuperación de cobre varia más de 1 %, es decir de 89.45% a 90.75%. Es la variable influyente.
- Factor B: Presenta una pendiente menos pronunciada, el cual indica el menor efecto, al incrementar el pH a10.5, la recuperación de cobre aumenta ligeramente a 90.56% de 90%.
- Factor C: Esta variable también presenta una pendiente pronunciada, el cual indica el efecto que tiene en relación a la recuperación de cobre, cuando se dosifica 30 g/T de colector (Z-6) la recuperación incrementa 89.70% a 90.89%. por lo tanto, también se considera un factor influyente respecto a la recuperación del concentrado de cobre.

Gráfico 10: Grafica de Cubos (Medias ajustadas) de % de Recuperación



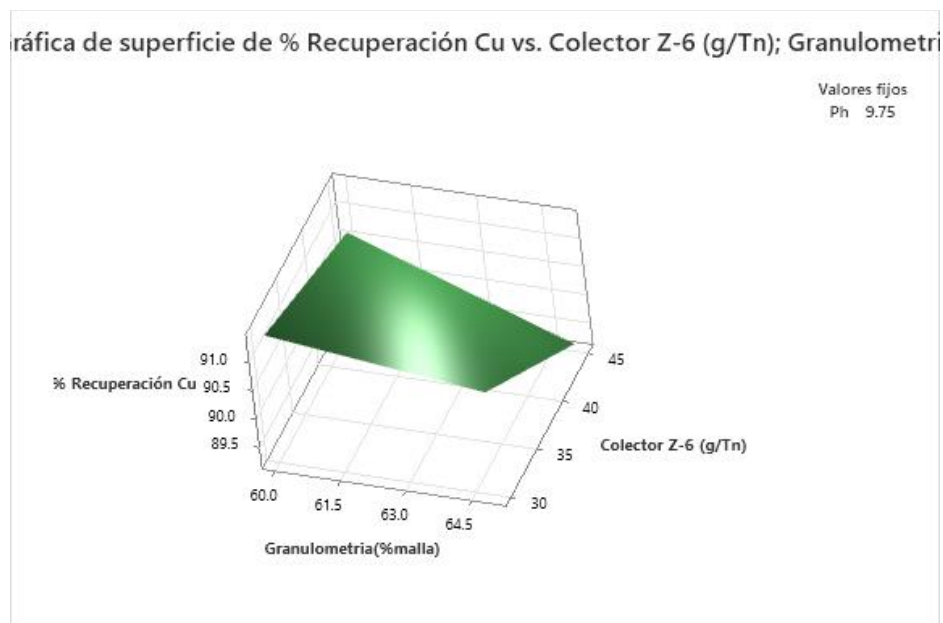
Nota: Variables más influyentes en % de recuperación como: Colector (g/Tn), Granulometría (% malla). Realizado en Minitab 21

Gráfico 11: Grafica de contorno de %Recuperación vs Colector y Granulometría



Nota: Elaborado en Minitab 21

Gráfico 12: Grafica Superficie de %Recuperación vs Colector, Granulometría



Nota: Elaborado en Minitab 21

Para obtener una recuperación de cobre mayores a 90% se puede observar en las gráficas de cubos(N°10), contorno(N°11) y superficie(N°12), los factores más influyentes del proceso son la granulometría y la dosificación de reactivos como el colector (Z-6). Con la ayuda de estas graficas se puede ratificar el efecto positivo respecto a la recuperación del concentrado de cobre en esta etapa de flotación bulk, ya que en esta etapa es donde recuperamos la más alta cantidad posible de concentrado de cobre para que en la siguiente etapa de flotación cleaner (Selectiva) se pueda alcanzar a la calidad de concentrado requerido, con la ayuda de pH, depresores, etc.

5.14. Balance Metalúrgico de Recuperaciones de Plomo en el Concentrado Bulk

A continuación, se muestra los balances metalúrgicos de flotación bulk del elemento Pb

Tabla 46:

Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°1

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	2.51
CONCENTRADO	643.71	11.01	70.87	54.94	
RELAVE	968.79	6.00	58.13	45.06	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 47:

Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°2

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.69
CONCENTRADO	954.00	7.31	69.74	54.06	
RELAVE	658.50	9.00	59.27	45.94	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 48:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°3*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.37
CONCENTRADO	1174.86	6.51	76.48	59.29	
RELAVE	437.64	12.00	52.52	40.71	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 49:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°4*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.66
CONCENTRADO	969.44	6.01	58.26	45.17	
RELAVE	643.06	11.00	70.74	54.83	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 50:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°5*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.30
CONCENTRADO	1240.38	5.90	73.18	56.73	
RELAVE	372.12	15.00	55.82	43.27	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 51:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°6*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.36
CONCENTRADO	1187.41	6.21	73.74	57.16	
RELAVE	425.09	13.00	55.26	42.84	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 52:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°7*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.43
CONCENTRADO	1128.75	5.00	56.44	43.75	
RELAVE	483.75	15.00	72.56	56.25	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 53:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°8*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.26
CONCENTRADO	1279.76	6.70	85.74	66.47	
RELAVE	332.74	13.00	43.26	33.53	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 54:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°9*

Fuente: Elaboración Propia

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.59
CONCENTRADO	1015.75	5.65	57.39	44.49	
RELAVE	596.75	12.00	71.61	55.51	

Tabla 55:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°10*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.90
CONCENTRADO	848.68	7.10	60.26	46.71	
RELAVE	763.82	9.00	68.74	53.29	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 56:*Balance Metalúrgico de Flotación Bulk-Pb de Prueba N°11*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	1612.50	8.00	129.00	100.00	1.44
CONCENTRADO	1118.50	5.35	59.84	46.39	
RELAVE	494.00	14.00	69.16	53.61	

Fuente: Elaboración Propia

La tabla N °57 muestra el resumen de las recuperación obtenida de cada prueba realizada en la etapa de flotación rougher en donde se obtiene un concentrado bulk. A partir del cual se realiza la flotación selectiva.

Tabla 57:

Resumen de Recuperaciones de Plomo en el Concentrado Bulk

N° Pruebas	%Recuperación Pb
1	54.94
2	54.06
3	59.29
4	45.17
5	56.73
6	57.16
7	43.75
8	66.47
9	44.49
10	46.71
11	46.39

Fuente: Elaboración Propia

5.15. Pruebas de Flotación Selectiva

Esta prueba experimentas se realiza a partir de los concentrados obtenidos en la primera flotación(colectiva) que consta de 8 pruebas correspondientes, aplicando el depresor de Bicromato de Sodio a la pulpa y los concentrados obtenidos se enviaron a laboratorio químico para su análisis.

Esta prueba se realiza en una celda de 1Lt de capacidad con un volumen de 403 ml de pulpa. Los cuadros siguientes muestran los resultados:

Rango de Variables

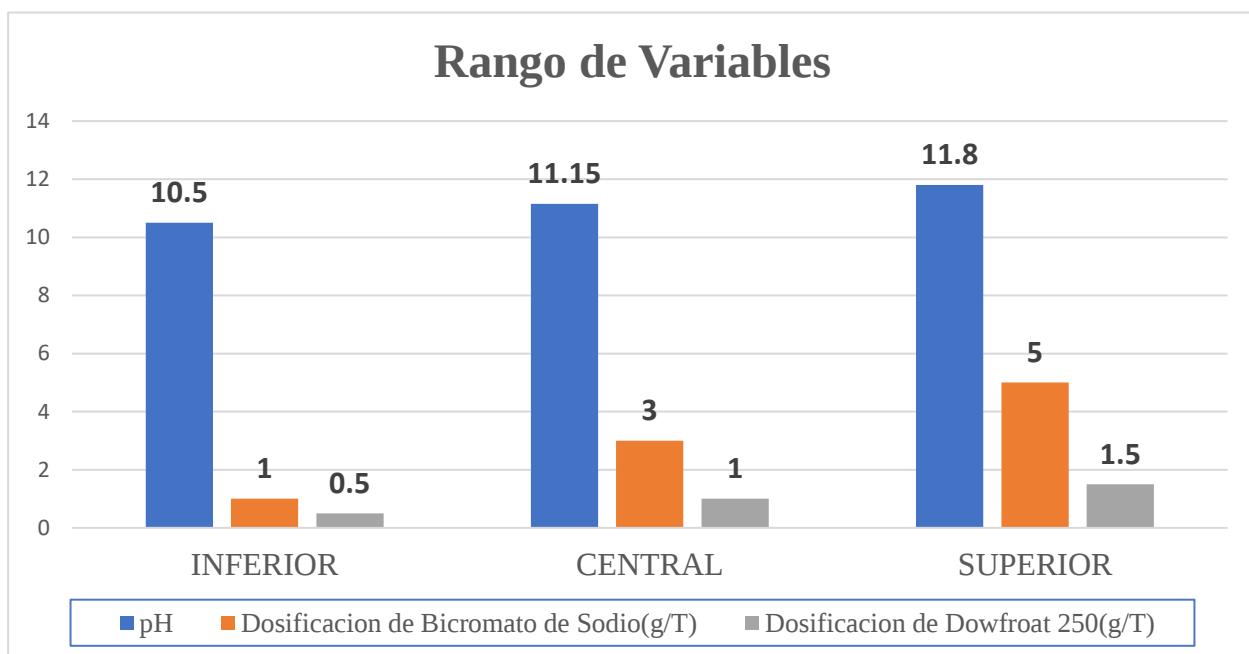
El valor máximo y mínimo de rango de variables son considerados de acuerdo a las necesidades operativas del trabajo de investigación, para obtener un diseño factorial completo. Para ello se consideran variables significativas para conseguir un grado de concentrado más limpio, sin contaminantes de sulfuros de plomo.

Tabla 58:

Rango de Variables para Flotación Selectiva

VARIABLES		NIVELES		
		Inferior	Central	Superior
X1	Bicromato de Sodio (g/T)	1	3	5
X2	pH	10.5	11.15	11.8
X3	Dowfroa 250(g/Tn)	0.5	1	1.5

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 13: *Rango de Variables Determinadas para Flotación Selectiva*

Fuente: Elaboración Propia

La dosificación de Dowfroa 250 en g/T, se considera para esta etapa con fines de obtener grana volumen de espumación y facilitar la realización del diseño experimental factorial, el cual se adiciona en mínima cantidad y que no tiene ningún efecto negativo en el proceso, como se puede observar en los siguientes resultados de diseños experimentales.

A continuación, se da a conocer los parámetros y condiciones dadas para cada prueba de flotación selectiva a nivel laboratorio y el balance metalúrgico correspondiente de cada prueba obtenida.

5.16. Pruebas de experimentación de flotación selectiva en laboratorio de procesamiento de minerales de E.P. Ingeniería Metalúrgica

Prueba de Flotación N°1:

La prueba se realiza bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 59:

Parámetros y Condiciones para la Prueba N°1 Flotación Selectiva

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
pH	10.5
Bicromato de Sodio(g/Ton)	1
Dosificación de Dowfroa 250 (g/Tn)	0.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 60:

Balance Metalúrgico Flotación Selectiva de la Prueba N°1

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	403.12	15.38	62.00	100.00	
CONCENTRADO	299.70	20.47	61.35	98.95	1.35
RELAVE	103.42	0.63	0.65	1.05	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°2:

Esta prueba se realiza bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 61:

Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°2.

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
pH	11.8
Bicromato de Sodio(g/Ton)	1
Dosificación de Dowfroa 250 (g/Tn)	0.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 62:

Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva de la Prueba N°2

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	403.12	16.62	67.00	100.00	
CONCENTRADO	271.92	24.34	66.19	98.79	1.48
RELAVE	131.20	0.62	0.81	1.21	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°3:

La prueba se realiza bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 63:

Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°3

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
pH	10.5
Bicromato de Sodio(g/Ton)	5
Dosificación de Dowfroa 250 (g/Tn)	0.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 64:

Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva Prueba N°3

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metalico	Recuperacion	K
CABEZA	403.12	14.88	59.98	100.00	
CONCENTRADO	264.48	22.36	59.14	98.59	1.52
RELAVE	138.64	0.61	0.85	1.41	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°4:

La prueba se realiza bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 65:

Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°4

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
pH	11.8
Bicromato de Sodio(g/Ton)	5
Dosificación de Dowfroat 250 (g/Tn)	0.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 66:

Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva d la prueba N°4

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	403.12	15.39	62.04	100.00	
CONCENTRADO	242.33	25.21	61.09	98.47	1.66
RELAVE	160.79	0.59	0.95	1.53	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°5:**Tabla 67:***Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°5*

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
pH	10.5
Bicromato de Sodio(g/Ton)	1
Dosificación de Dowfroa 250 (g/Tn)	1.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 68:*Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva N°5*

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	403.12	15.20	61.27	100.00	
CONCENTRADO	297.94	20.34	60.60	98.90	1.35
RELAVE	105.18	0.64	0.67	0.67	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°6:

La prueba se realiza bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 69:

Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°6

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
pH	11.8
Bicromato de Sodio(g/Ton)	1
Dosificación de Dowfroa 250 (g/Tn)	1.5
Fuente: Elaboración Propia	

Tabla 70:

Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva de Prueba N°6

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	403.12	11.54	46.52	100.00	
CONCENTRADO	206.19	21.97	45.30	97.38	1.96
RELAVE	196.93	0.62	1.22	2.62	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°7:

La prueba se realiza bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 71:

Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°7

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
Ph	10.5
Bicromato de Sodio(g/Ton)	5
Dosificación de Dowfroa 250 (g/Tn)	1.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 72:

Balance Metalúrgico de Flotación Selectiva Prueba N°7

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	403.12	13.20	53.21	114.38	
CONCENTRADO	245.30	21.30	52.25	98.19	1.64
RELAVE	157.82	0.61	0.96	2.07	

Fuente: Elaboración Propia

Prueba de Flotación N°8:

La prueba se realiza bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 73:

Parámetros y Condiciones para la Prueba de Flotación Selectiva N°8

Flotación	
Flotación (RPM)	1500
Tiempo en Flotación (min)	4
Condicionamiento (RPM)	1200
Ph	11.8
Bicromato de Sodio(g/Ton)	5
Dosificación de Dowfroa 250 (g/Tn)	1.5

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 74:

Balance Metalúrgico de flotación Selectiva Prueba N°8

PRODUCTO	Peso(g)	Ley (%)	Cont. Metálico	Recuperación	K
CABEZA	403.12	12.54	50.55	108.67	
CONCENTRADO	190.47	25.87	49.27	97.47	2.12
RELAVE	212.65	0.60	1.28	2.74	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 75:

Resumen de Parámetros Aplicados en Cada Prueba Experimental y Resultados

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Ph	Dosificacion del Depresor(g/T)	Dosificacion del Espumante(g/T)	LEY(%)
1	1	1	1	1	10.5	1	0.5	20.47
2	2	2	1	1	11.8	1	0.5	24.34
3	3	3	1	1	10.5	5	0.5	22.36
4	4	4	1	1	11.8	5	0.5	25.21
5	5	5	1	1	10.5	1	1.5	20.34
6	6	6	1	1	11.8	1	1.5	21.97
7	7	7	1	1	10.5	5	1.5	21.30
8	8	8	1	1	11.8	5	1.5	25.87

Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Tabla 76:

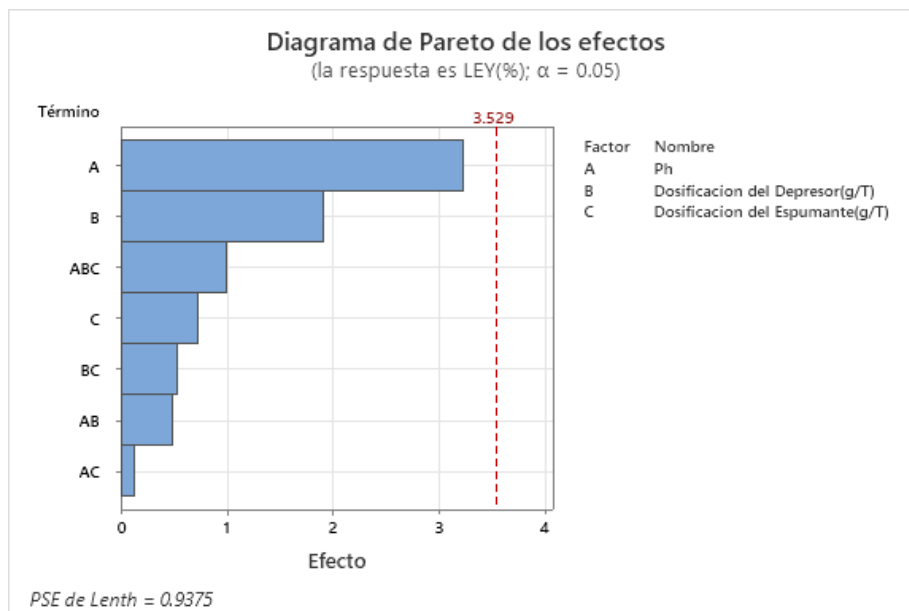
Ecuación de Regresión

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

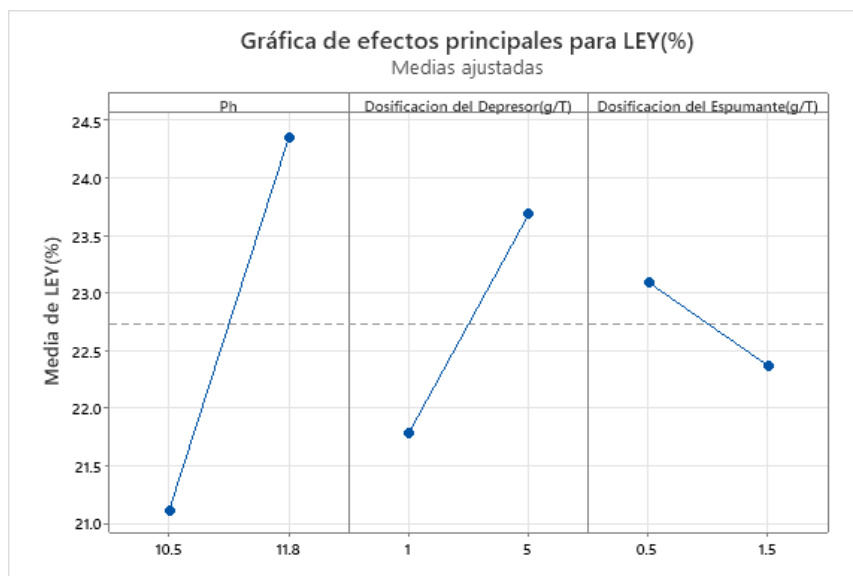
$$\begin{aligned}
 \text{LEY(\%)} = & -26.42 + 4.415 \text{ Ph} + 6.646 \text{ Dosificacion del Depresor(g/T)} \\
 & + 26.19 \text{ Dosificacion del Espumante(g/T)} - 0.5769 \text{ Ph*Dosificacion del Depresor(g/T)} \\
 & - 2.485 \text{ Ph*Dosificacion del Espumante(g/T)} \\
 & - 8.229 \text{ Dosificacion del Depresor(g/T)*Dosificacion del Espumante(g/T)} \\
 & + 0.7615 \text{ Ph*Dosificacion del Depresor(g/T)*Dosificacion del Espumante(g/T)}
 \end{aligned}$$

Fuente: Minitab 21.

La tabla N°75 indica los resultados obtenidos de cada corrida de prueba experimental a nivel laboratorio y los parámetros a las cuales se dieron cada prueba. Se adicionó el factor dosificación de espumante en esta etapa con el objetivo de lograr una espumación masiva y obtener volumen de masa para él envío a laboratorio, el cual no tiene ningún significado en las evaluaciones de grado de concentrado, los cuales se demuestran en los diseños siguientes.

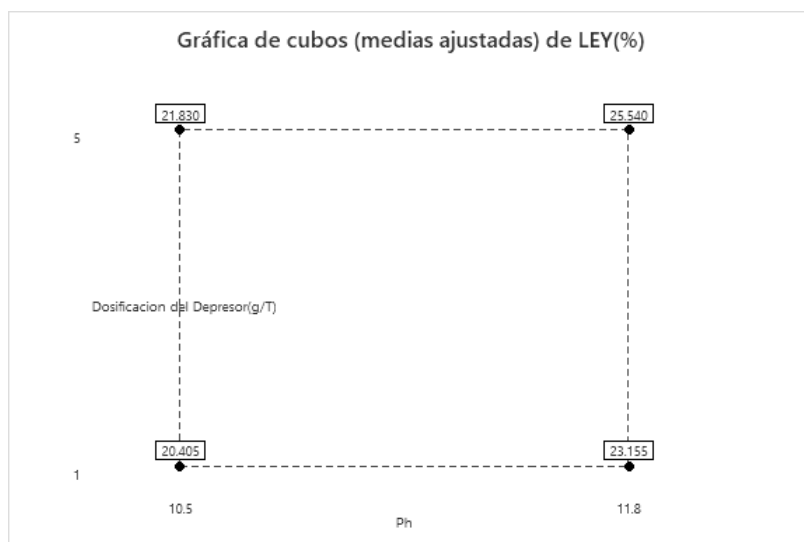
Gráfico 14:*Diagrama Pareto de los efectos Flotación Selectiva*

Nota: A: pH, B: Dosificación del Depresor ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en g/T, C: Dosificación de Espumante(g/Tn), Elaborado en Minitab 21.

Gráfico 15:*Gráfica de Efectos Principales para Ley en Flotación Selectiva*

Fuente: Elaborado Propia en Minitab 21.

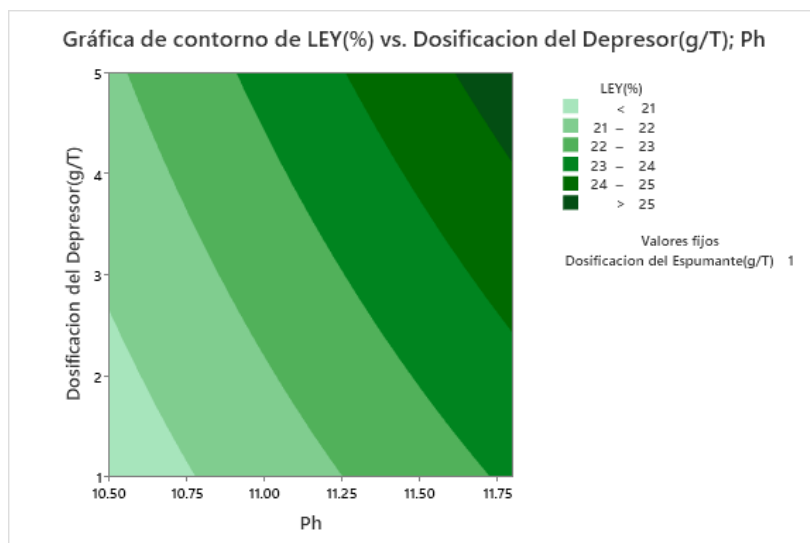
Gráfico 16: Gráfico de Cubos (Medias Ajustadas) de Ley (%)



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Gráfico 17:

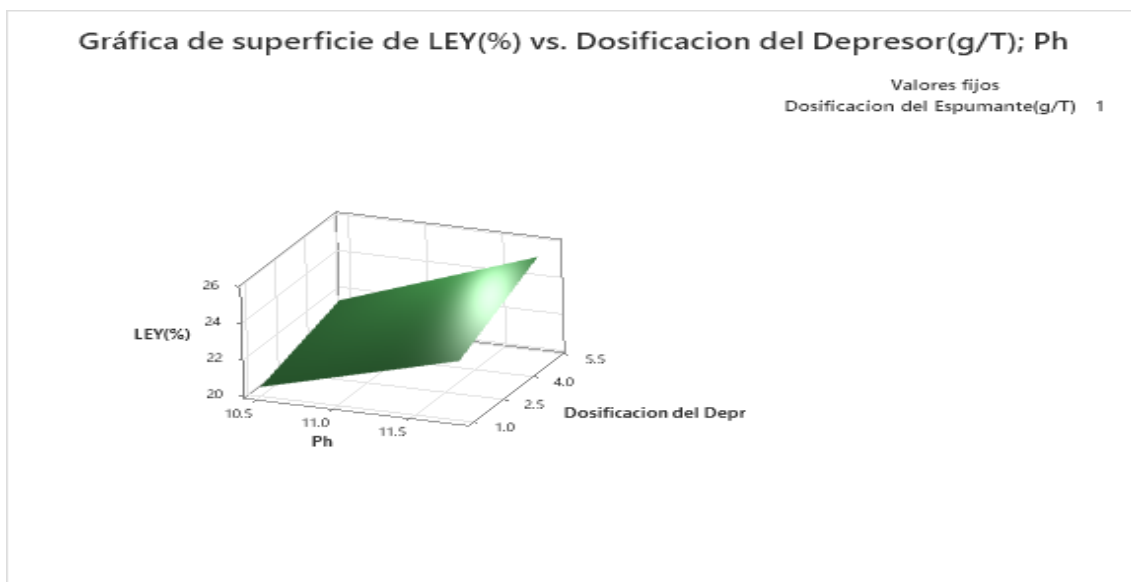
Gráfica de Contorno de Ley (%) vs Dosificación del Depresor y pH



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21

Gráfico 18:

Grafica de Superficie de Ley (%) vs Dosificación del Depresor y pH en Flotación Selectiva



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21

En el grafico N°14 de diagrama de Pareto se puede observar que los factores más influyentes en esta etapa de flotación selectiva son el pH y la dosificación del Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$), los cuales se pueden analizar a mas detalle en la gráfica de efectos principales (N°15) que muestra de manera individual cada factor de la siguiente manera:

- Factor A: Es una pendiente bastante pronunciada positivamente, que alcanzando a un pH de 11.8 se tiene un agrado de concentrado(%ley) por encima de 24%. El cual indica variable influyente en el proceso.
- Factor B: También se muestra pendiente pronunciada, indica que dosificando el ($Na_2Cr_2O_7$) a 5 g/T se alcanza a un grado de concentrado por encima de 23.5 % deprimiendo la galena y obteniendo un concentrado más limpio. Factor Influyente.

- Factor C: se puede observar que no tiene efecto ninguno en el proceso

En los gráficos de cubos (N° 16), contorno(N°17) y superficie(N°18) se puede corroborar que las variables que influyen en etapa de flotación selectiva.

CAPITULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

6.1. Diseño de Superficie de Respuesta para el Análisis de Resultados con Minitab 21.

Este diseño experimental de superficie de respuesta es tomado para realizar el análisis minucioso y óptimo de los resultados obtenidos en las etapas de flotación bulk(colectiva) y selectiva que fueron analizados con el diseño factorial de 3 variables y dos niveles, es decir (2^3) de las pruebas experimentales a nivel laboratorio, en base a los objetivos de la investigación como: Granulometría (%malla), pH y dosificación de Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$).

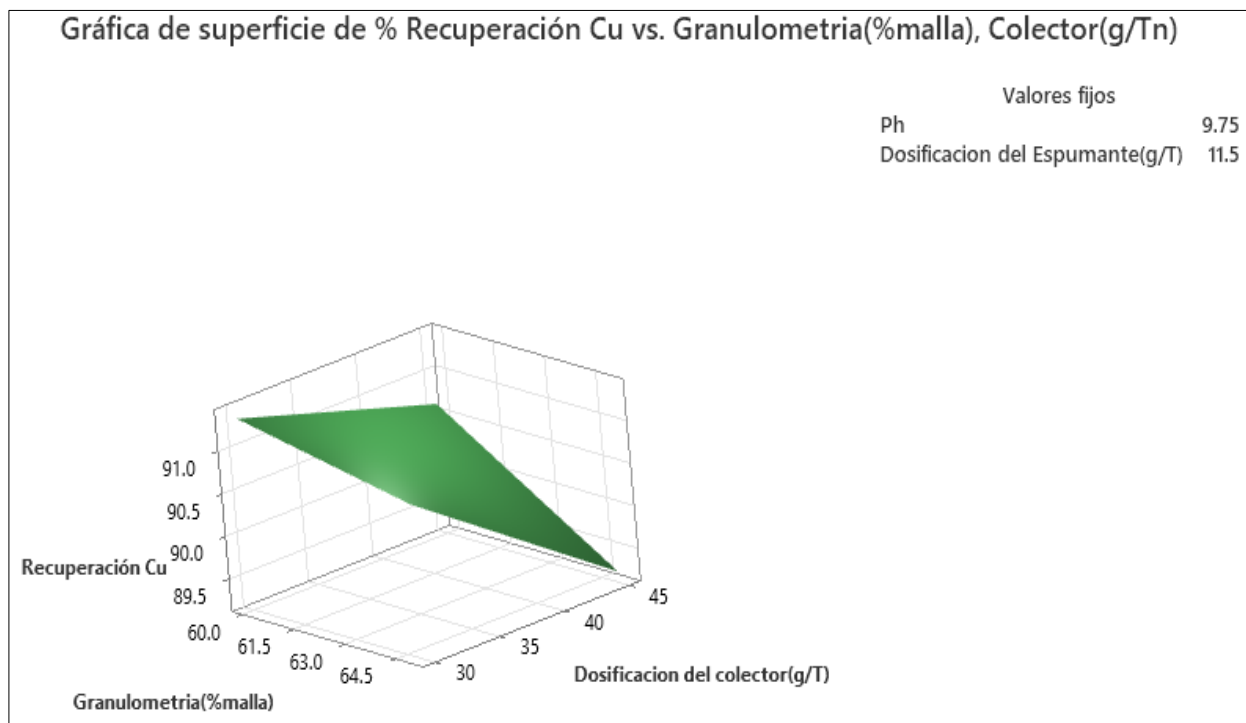
La matriz de diseño factorial (2^3) para realizar pruebas experimentales y el porcentaje de recuperaciones obtenidas como leyes de concentrado se construye una matriz de diseño para la realización de pruebas de flotación y para las respuestas obtenidas a través de software Minitab 21.

6.2. Análisis en las Pruebas Experimentales para la Recuperación de Cobre con Diseño Factorial y Hexagonal

En esta primera etapa de pruebas experimentales de flotación se obtiene un concentrado bulk en donde se obtiene las recuperaciones máxicas (Tabla N°42) de cada una de las pruebas realizadas, estos resultados son analizados por diseño Factorial, el cual muestra en la (Grafico N° 18), que las variables más significativas estadísticamente son la granulometría(%malla) y la adición del colector (Z-6), en donde se alcanza una recuperación mayor a 91% a una granulometría entre (60-62)%-malla200 y que esta optimización seria aplicada en la operación.

Gráfico 19:

Gráfica de Superficie para % Recuperación de Cu

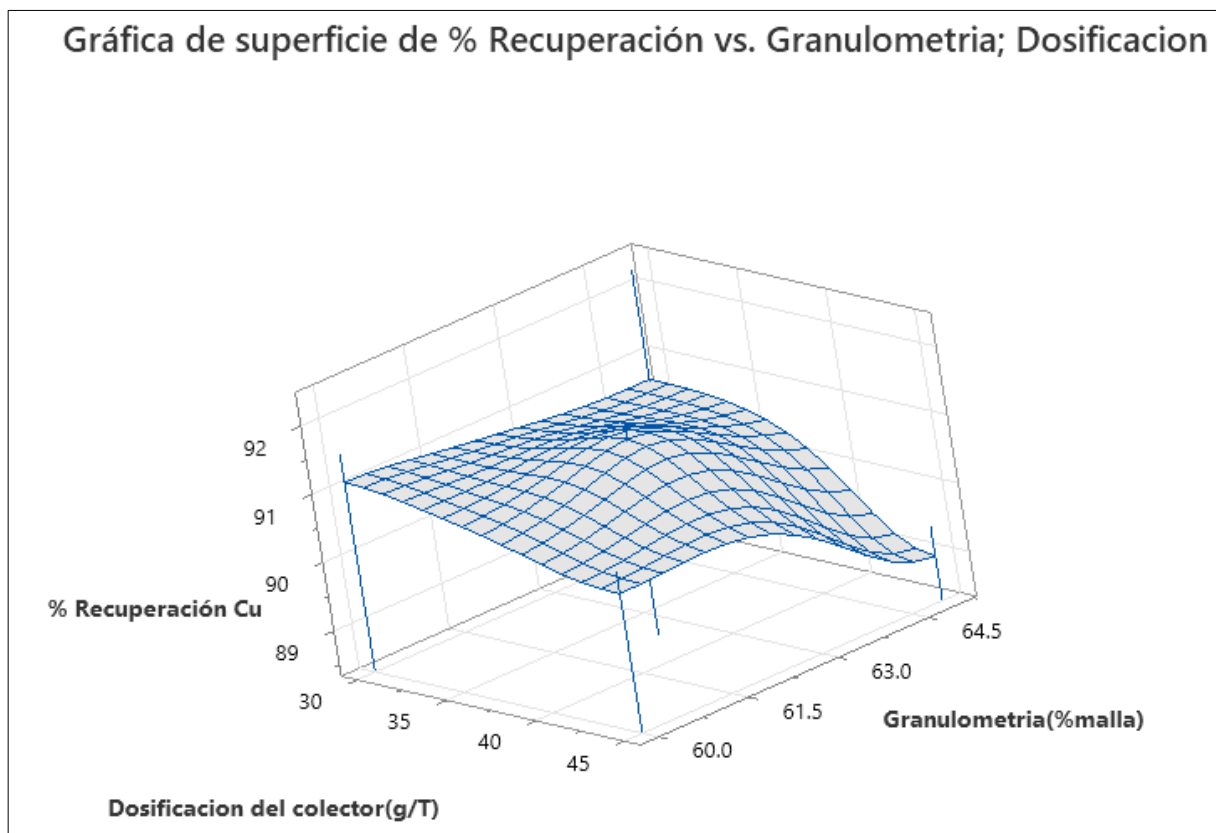


Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21

Este grafico N°19, nos muestra la significancia de las dos variables en conjunto frente a la recuperación de cobre mediante una superficie en donde se puede verificar que efectivamente que la variable objetivo, en este caso la granulometría entre 60-65%-malla200, tiene significancia positiva respecto a la recuperación de cobre.

Gráfico 20:

Gráfica de Superficie de % Recuperación de Cu vs Granulometría(%malla), Colector



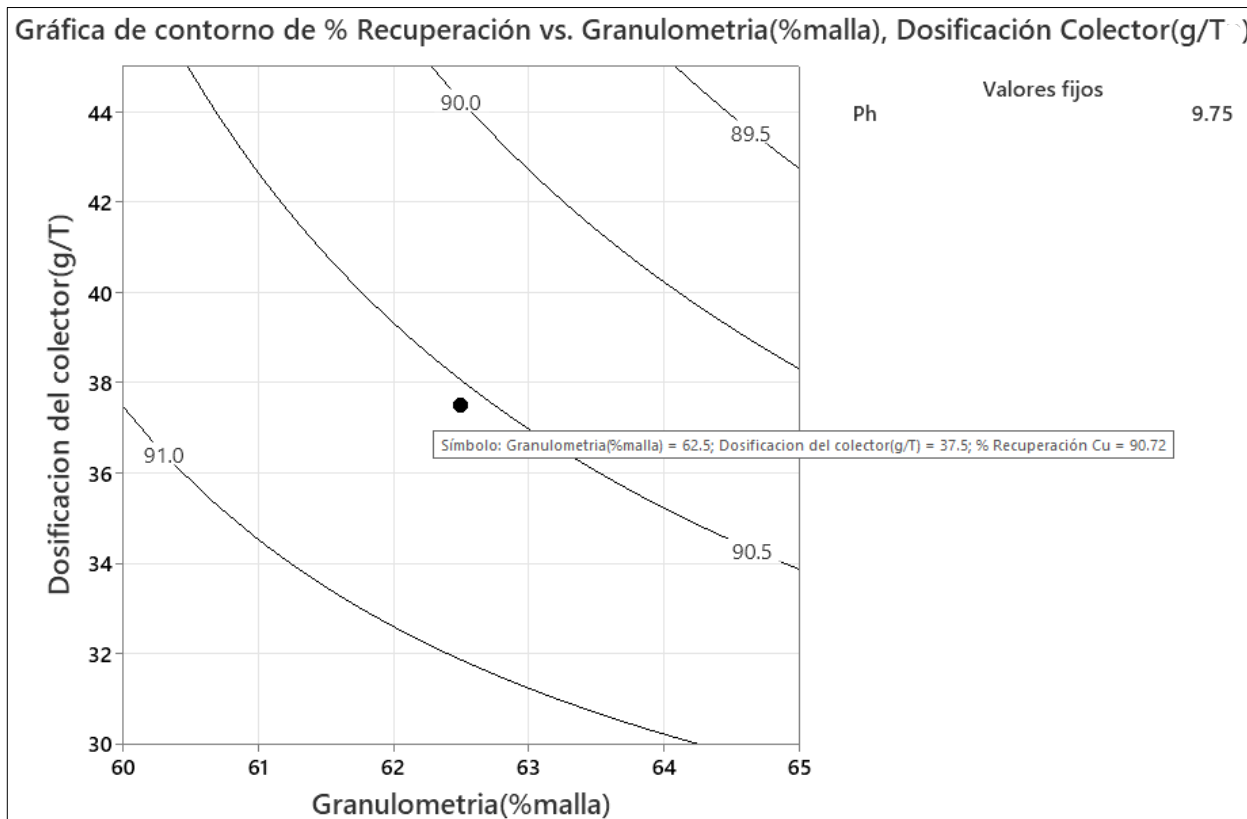
Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

En este gráfico de Superficie N°20, visualizando y analizando las proyecciones indicadas muestra que, para llegar a la cima de la superficie, el cual representa la función objetivo que es la recuperación óptima, se debe considerar una granulometría entre los valores de 61.5% y 63%-malla200. También es importante mencionar la influencia del colector Z-6(g/T) para recuperar cobre en su totalidad posible para luego limpiar en las siguientes circuitos de flotación en planta concentradora, esta dosificación del colector es considerada según la estadística entre los valores de 35-40g/T.

Gráfico 21:

Grafica de Contorno de % Recuperación de Cobre vs Granulometría y Dosificación del Colector

Gráfica de contorno de % Recuperación vs. Granulometría(%malla), Dosificación Colector(g/T)

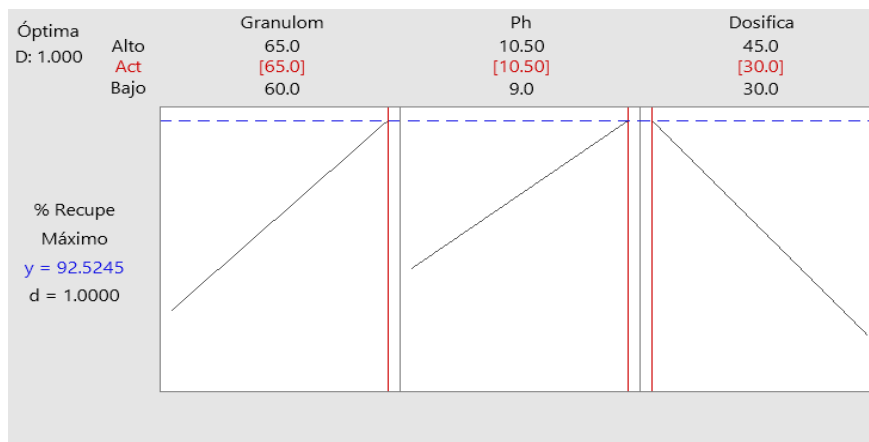


Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Para la toma de decisiones a nivel industrial es necesario e importante verificar los resultados de todos los diseños experimentales posibles con el objetivo de optimizar y encontrar variables o parámetros estables con un efecto positivo a la recuperación de cobre, en ese sentido el grafico N° 21 hace referencia datos más específicos como la granulometría de 62.5%-malla200 y Colector 37.5g/T , con estas dosificaciones especificas se obtiene una recuperación de 90.72% de cobre, el cual es considerable para nuestro objetivo.

Gráfico 22:

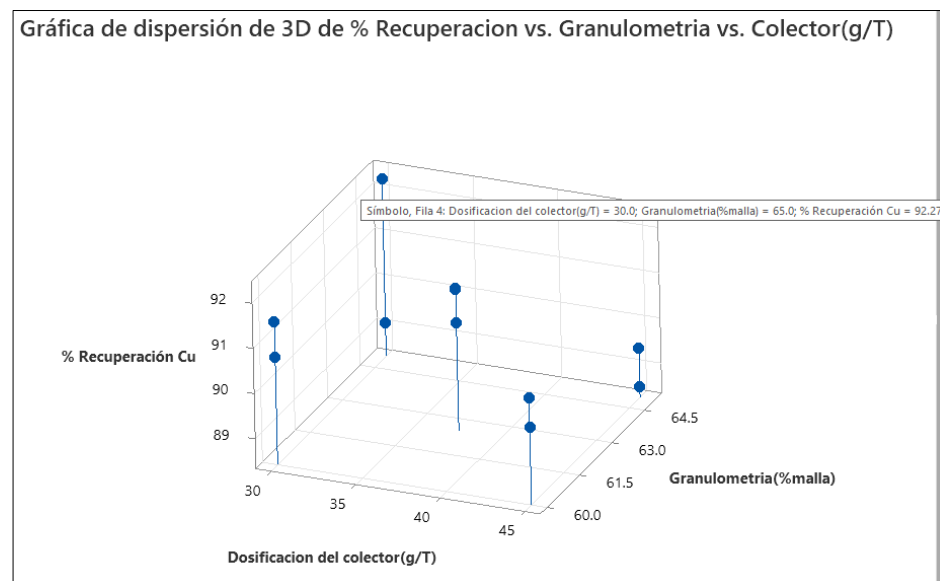
Gráfica de Optimización de % de Recuperación de Cobre



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Gráfico 23:

Gráfica de Dispersión de %Recuperación Cu vs Granulometría,



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Los gráficos N°22 y 23, muestran la máxima optimización de respuesta u objetivo de las variables, en donde maximizando el valor objetivo de recuperación de cobre a 92.5% se debe

llegar a una granulometría de 65%-malla200, con esto se podrá cumplir las expectativas del proyecto de investigación y el cumplimiento de los KPI en U.M. Constancia.

6.3. Análisis en las Pruebas Experimentales para la Ley o grado de Concentrado de Cobre con Diseño Hexagonal.

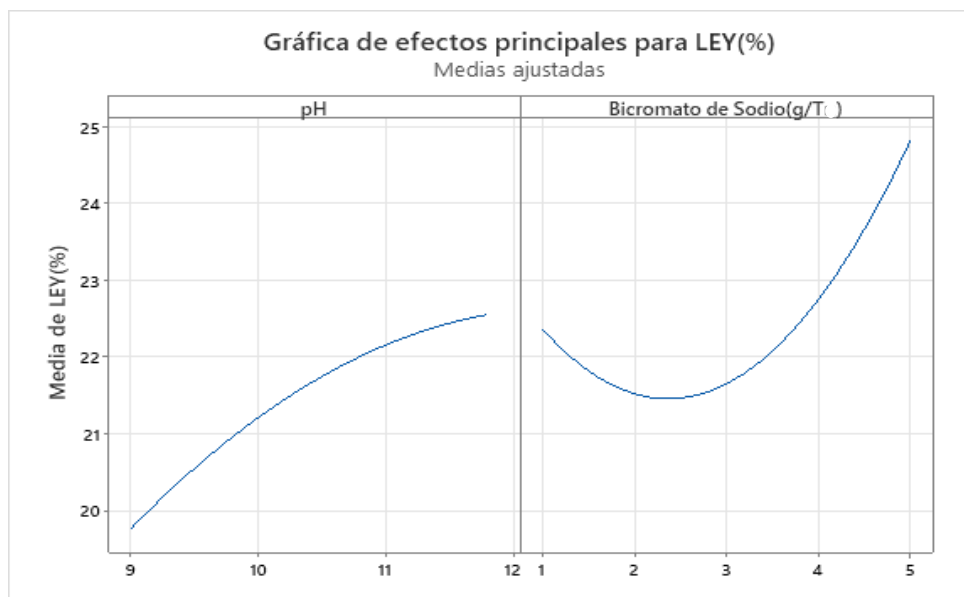
Para la obtención de una ley o grado del concentrado comerciable sin penalizaciones se realiza una segunda etapa de prueba experimental en donde es dosificado el Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) y pH para finalmente obtener un grado de concentrado mas limpio y comerciable, estas dosificaciones se realizan de acuerdo a los rangos superior e inferior para cada prueba experimental.

En este capítulo se da a conocer las variables más influyentes y significativos que optimizan la calidad del concentrado final, dado que de la Figura N° 23 que muestra claramente de forma individual. Se puede deducir que alcanzando a un pH mayor a 11.8 en la etapa de flotación selectiva, se puede obtener un grado de concentrado (%Ley) de cobre mayor a 22% y dosificando el Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) a 5g/Tn se obtiene un grado de concentrado de cobre más limpio por encima de 24%, es decir no se tiene la presencia de galena(PbS) en el concentrado final que sin ningún problema tendría que pasar a otra etapa de tratamiento y su comercialización, por lo tanto se daría el cumplimiento de los KPI's diaria o mensual.

Es importante señalar que la dosificación de Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) fue evaluada en la flotación Selectiva, es decir, en una etapa de limpieza o Cleaner que también es dosificada lechada de cal a dicha etapa. Que se muestran los resultados en los siguientes gráficos de diseño experimental

Gráfico 24:

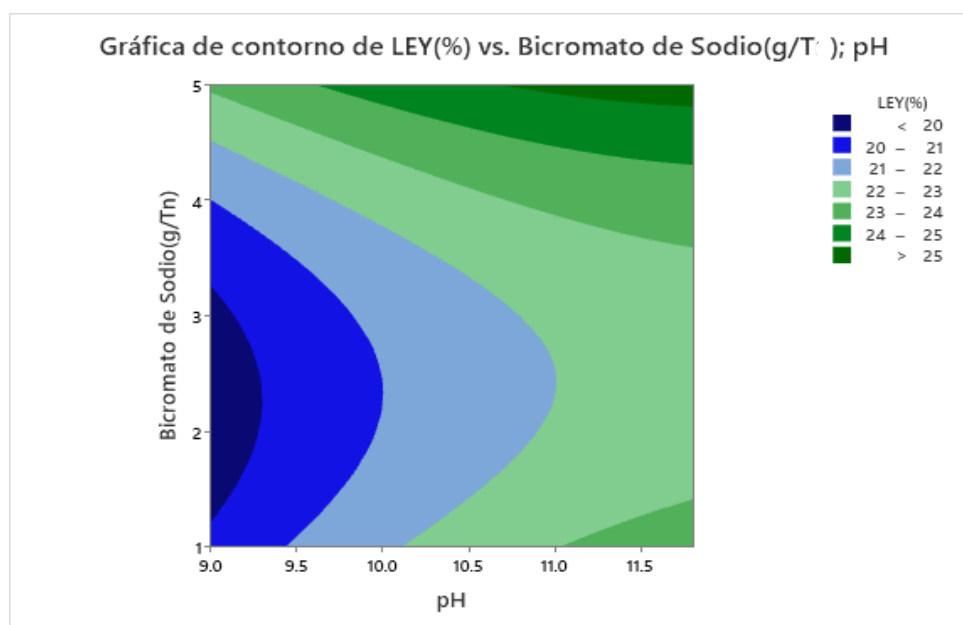
Gráfica de Efectos Principales de Ley de Concentrado (Grado de Concentrado)



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Gráfico 25:

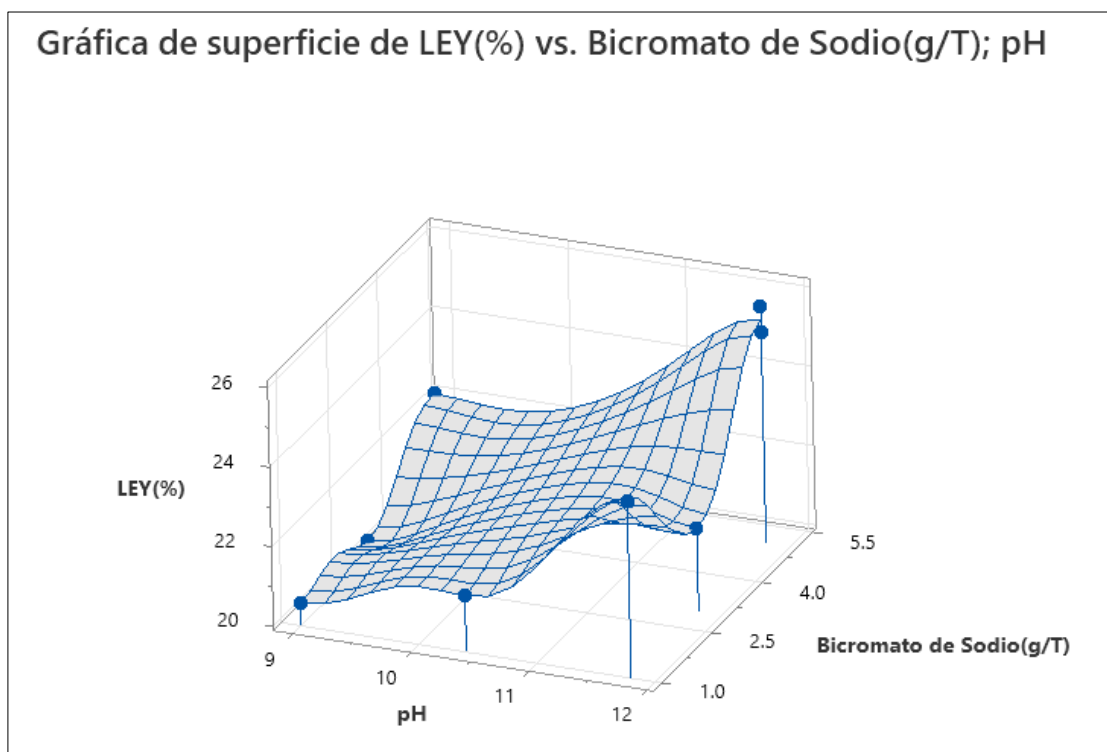
Gráfica de Contorno de Ley (%) vs Bicromato de Sodio(g/TM) y pH



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Gráfico 26:

Grafica de Superficie de Ley (%) en Función de las variables Objetivo Especifico



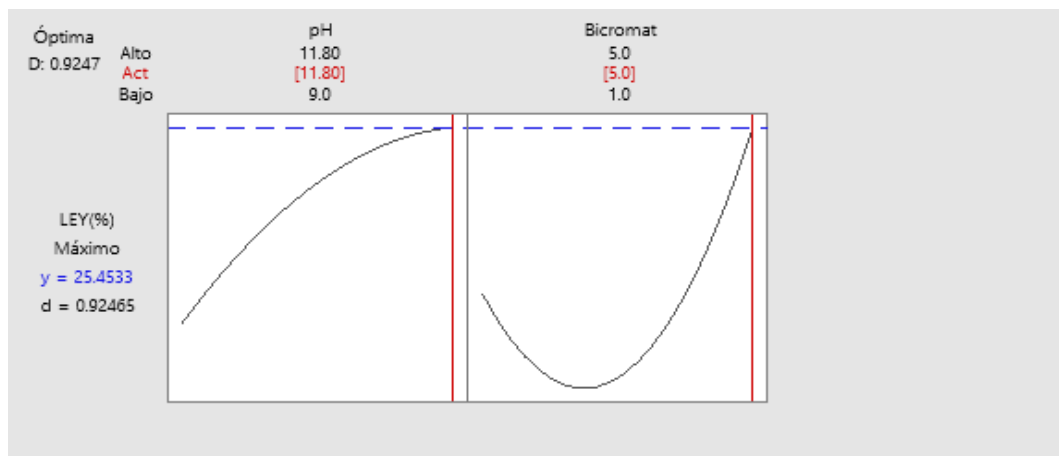
La grafica de entorno N°25, muestra claramente por variedad de tonalidades de color las variables como: pH y dosificación de Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$). Donde cado uno de ellos está en función del grado de concentrado de cobre final, se verifica que por valores mayores o iguales a 11.8 de pH y a una dosificación de 5g/T de ($Na_2Cr_2O_7$) la calidad del concentrado es afectado positivamente mayores a 24% de cobre.

Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

La grafica de superficie N°26 muestra las proyecciones de cada punto influyente al valor objetivo del proyecto, el punto más significativo o la cima alta según a la superficie el cual es la calidad del concentrado de cobre final se verifica que el depresor ($Na_2Cr_2O_7$) es importante para la disminución de la galena en el concentrado de cobre.

Gráfico 27:

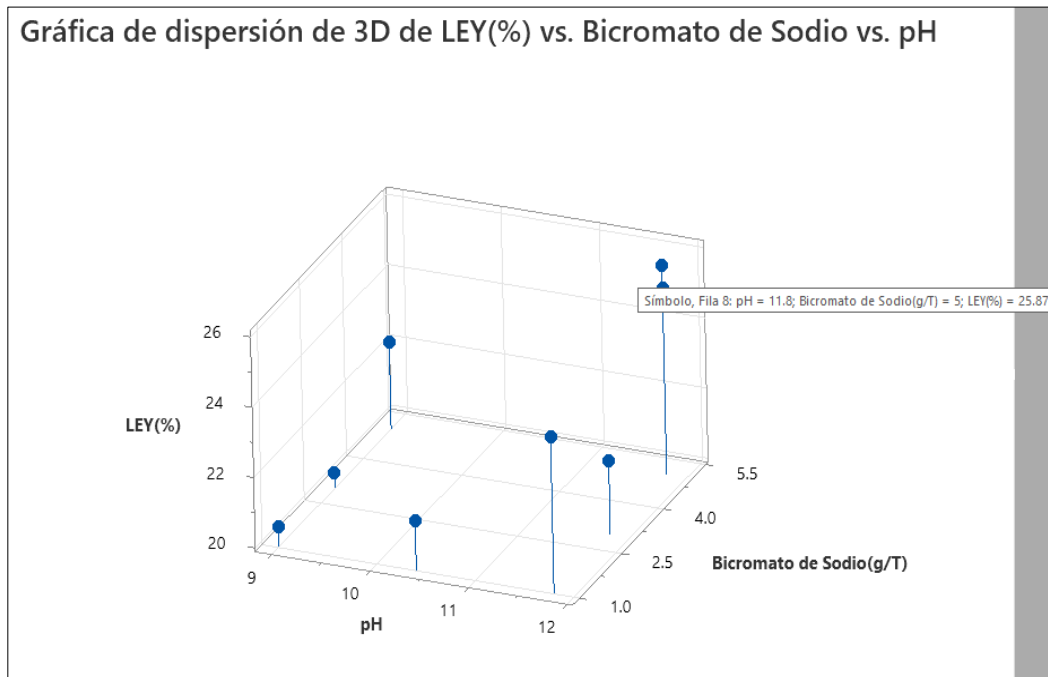
Gráfica de Optimización de Ley (%) de Cobre en del Concentrado



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Gráfico 28:

Gráfica de Dispersión de ley (%) vs Bicromato de Sodio(g/T), pH



Fuente: Elaboración Propia en Minitab 21.

Para dar conformidad a los objetivos planteados en este proyecto de investigación en relación a la buena calidad del concentrado final de cobre(%ley), la dosificación y el efecto de depresión de galena por Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) aplicado a la etapa de flotación selectiva o cleaner, se puede verificar esos datos mediante el análisis y visualización de los gráficos estadísticos de optimización N°27, 28. Para alcanzar a un grado de concentrado (% ley) final de 25.45%, es necesario alcanzar a un pH de 11.80 y una dosificación de ($Na_2Cr_2O_7$) de 5 g/T , el cual podrá ser comercializada sin ningún tipo de problemas. También es oportuno señalar que la dosificación de lechada de cal desde la etapa de flotación bulk es influyente en el grado de concentrado ya que ayuda a flotar y recuperar un concentrado limpio y obviamente se puede verificar que incrementando el ph en la etapa de flotación selectiva(Cleaner)la calidad de concentrado es mucho más limpio sin contaminantes y deprimido los sulfuros de plomo(galena) por ($Na_2Cr_2O_7$).

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- ❖ En las pruebas experimentales realizadas a nivel laboratorio de E.P. Ingeniería Metalúrgica de flotación bulk de concentrados de cobre y plomo. Donde en cada prueba se tuvo parámetros de operación distintas, los cuales se vieron reflejados positivamente. Para llegar a una recuperación máxima u optima de 92.5% de concentrado de cobre.
- ❖ Para obtener una recuperación de 92.5% de cobre en el concentrado Rougher se debe llegar a una granulometría de 65%-malla200 en el overflow de los hidrociclones como producto de la etapa de molienda.
- ❖ En la flotación selectiva se determinó la significancia positiva de pH para la separación de cobre-plomo, esta variable es fundamental para obtener una ley de concentrado de cobre más limpio. Para dicha separación en esta etapa de flotación selectiva se determinó que a un pH de 11.8 se obtiene un concentrado de cobre a 25.45% de pureza.
- ❖ La dosificación de Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) en la etapa de flotación selectiva tuvo efecto positivo en relación a la separación de plomo del cobre, el cual influye significativamente en la ley de concentrado final de cobre. por lo tanto, se obtuvo un concentrado con un grado de 25.45% Cu a una dosificación de 5g/T de $Na_2Cr_2O_7$, el cual con la influencia de pH optimizada de 11.8 aun es claramente considerable para deprimir el plomo en un concentrado bulk de cobre y plomo.

7.2. Recomendaciones

- ❖ Se sabe que en planta concentradora se tiene 3 etapas cleaner o de limpieza, los cuales reciben flujo masico de concentrados rougher con una ley baja ($<15.38\%$) de concentrado de cobre. La dosificación de reactivo específico de Bicromato de Sodio ($Na_2Cr_2O_7$) se recomienda adicionar en la primera etapa de limpieza (Cleaner 1A) para que exista mas tiempo de residencia en el circuito y pueda actuar con mayor eficiencia, por lo tanto, obtener el grado de concentrado final comerciable (Ver Anexos 3). Cabe señalar que esta dosificación se debe realizar de forma puntual, cuando ley de plomo sea considerablemente alta o que afecte al concentrado final de cobre.

ASPECTOS OPERATIVOS

A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

La matriz de consistencia se da a conocer en la siguiente Tabla 77:

Tabla 77:*Matriz de Consistencia*

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
P.G. ¿Se podrá separar el plomo del cobre por flotación selectiva con una mezcla de reactivos específicos para optimizar la recuperación del cobre en la Unidad minera Constancia?	O.G. Separar el plomo del cobre por flotación selectiva con uso de reactivos específicos para optimizar la recuperación del cobre en la Unidad minera Constancia.	H.G. Deprimiendo el plomo con reactivos adecuados, se optimiza eficientemente la recuperación del cobre en la Unidad minera Constancia.	Variable dependiente: Recuperación de cobre.	Investigación: Tecnológica cuantitativa Tipo de Investigación: Cuantitativa experimental Nivel de Investigación: Descriptivo y explicativo
Problemas específicas P.E. ¿Cuál será la granulometría óptima del mineral para la recuperación de cobre? P.E. ¿Cuál será el pH adecuado del proceso de flotación selectiva para separar el cobre del plomo? P.E. ¿Sera posible la separación de Cu-Pb con la adición de Bicromato de Sodio para optimizar la recuperación y ley de concentrado de cobre?	Objetivos específicos O.E. Determinar la granulometría óptima del mineral para la recuperación de cobre. O.E. Determinar el pH adecuado del proceso de flotación selectiva para separar el cobre del plomo O.E. Determinar posible separación y dosificación adecuada de Bicromato de Sodio para optimizar la recuperación y ley de concentrado de cobre	Hipótesis específicas H.E. La granulometría adecuada para la recuperación de cobre 60-65%- malla 200. H.E. El proceso de flotación selectiva para separar el cobre del plomo está entre un pH de 9 a 11. H.E. La dosificación adecuada de Bicromato de Sodio para optimizar la recuperación y ley de concentrado de cobre.	Variable Independiente - Tamaño de grano Dimensión micrómetros - pH Dimensión 9 a 11 - Concentración de reactivos Dimensión g/L.	Diseño de investigación X → Y X= Causa (V. Independientes) Y= Efecto (V. Dependiente) Diseño Factorial 2³. Población: Los minerales sulfurados de la Unidad Minera constancia. Muestra: 50 kg de mineral para las pruebas por conveniencia Técnicas de recolección de datos: - Observación - Experimentación - Carpeta de trabajo - Computadora - Gráficos y tablas.

Nota: Elaboración Propia

Referencia Bibliográfica

- Cabala, J. M. (2003). *Procesamiento de Minerales*. Lima, Peru.
- Gonzales, H. L. (2006). *Metodologia de la Investigación*. Colombia.
- Hudbay. (2023). *Manual de Operaciones de Planta Concentradora*.
- Jiao, F. (2021). sustitución del bicromato por mezclas depresoras en los sulfuros de cobre plomo en flotación.
- John, A. (2014). *Evaluacion de Separacion del Concentrado de Plomo-Cobre en la Planta Concnetradora Mahr Tunel Uea Yali-Volcan compañia minera SAC*.
- Linares Gutiérrez, N. (2009). *Procesamiento de Minerales* . 13.
- Medina Vargas , E. E. (2018). *Evaluacion para la Recuperacion de Concentrado de Cobre a Partir del Concentrado Bulk Plomo-Cobre en Planta Concentradora Ana Maria, Brexia Gold Plata Perú S.A.C.*
- Paraguay Garcia, J. J. (2018). *Reemplazo Parcial del Bicromato por el Bisulfito de Sodio en la Separación de Sulfuros de Cu-Pb Mediante Flotación a Nivel Laboratorio*.
- Ran, J.-C. (2017). *Efectos del tamaño de partícula en el rendimiento de flotación en la separación de cobre, oro y plomo*.
- Sutulov, A. (1993). *Flotacion de Minerales*. 93.
- Tarazona Trujillo, W. (2012). *Metalurgia de Cobre, Facultad deIngenieria Quimica y Metalurgia* .
- Zampieri, R. F. (2014). *Metodologia de Investigación* (6 ed.). Mexico, Mexico.

ANEXOS

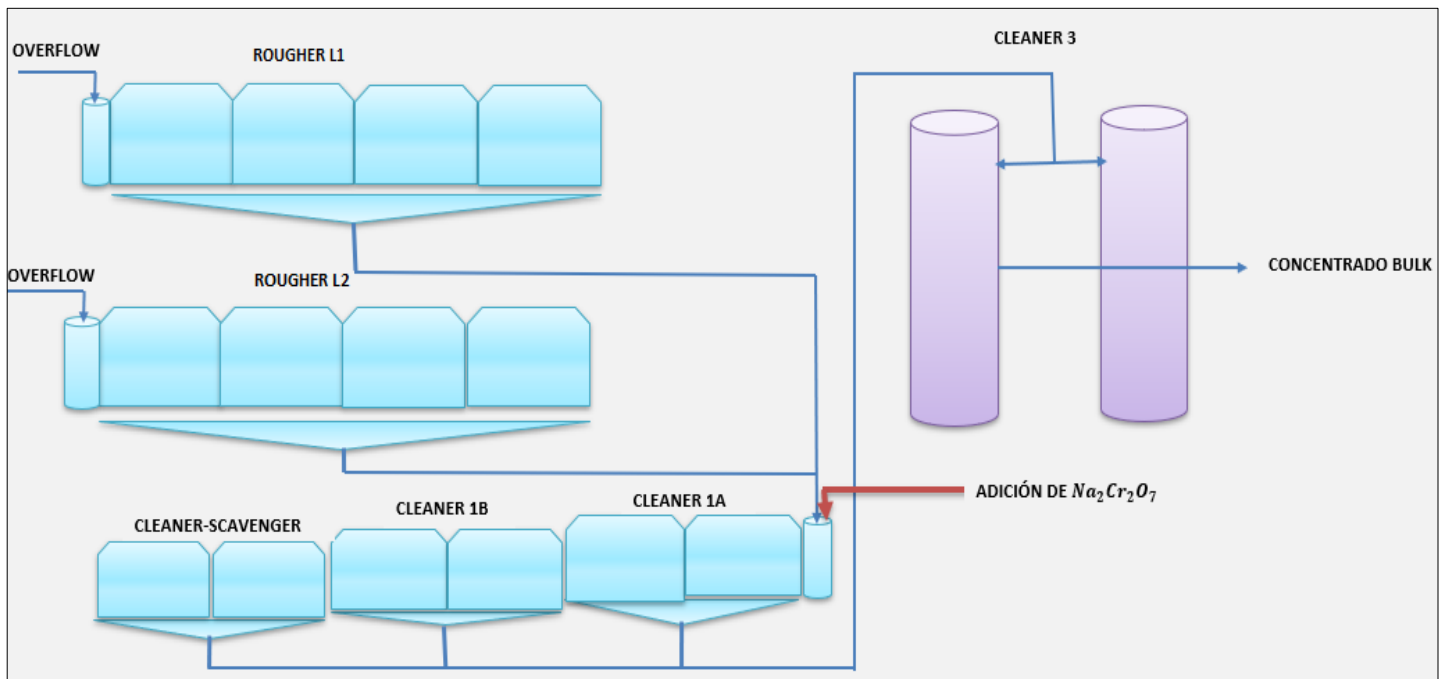
Anexo N° 1: Serie de tamiz acorde a la norma ASTM y TYLER

ABERTURA	SERIE ASTM N° DE TAMIZ	SERIE TYLER N° DE TAMIZ
107.6 mm	4.24''	-
101.6 mm	4''	-
90.5 mm	3 1/2''	-
76.1 mm	3''	-
64.0 mm	2 1/2''	-
53.8 mm	2.12''	-
50.8 mm	2''	-
45.3 mm	1 3/4''	-
38.1 mm	1 1/2''	-
32.0 mm	1 1/4''	-
26.9 mm	1.06''	-
25.4 mm	1''	-
22.6 mm	7/8''	0.883''
19.0 mm	3/4''	0.742''
16.0 mm	5/8''	0.624''
13.5 mm	0.539''	0.525''
12.7 mm	1/2''	-
11.2 mm	7/16''	0.441''
9.51 mm	3/8''	0.371''
8.0 mm	5/16''	2.172''

6.73 mm	0.265''	3
6.35 mm	¼''	-
5.55 mm	3 ½''	3 1/2
4760 µm	4	4
4000 µm	5	5
3360 µm	6	6
2830 µm	7	7
2380 µm	8	8
2000 µm	10	9
1680 µm	12	10
1410 µm	14	12
1190 µm	16	14
1000 µm	18	16
841 µm	20	20
707 µm	25	24
595 µm	30	28
500 µm	35	32
420 µm	40	35
354 µm	45	42
297 µm	50	48
250 µm	60	60
210 µm	70	65

177 µm	80	80
149 µm	100	100
125 µm	120	115
105 µm	140	150
88 µm	170	170
74 µm	200	200
63 µm	230	250
53 µm	270	270
44 µm	325	325
37 µm	400	400

Nota: Norma ASTM y TYLER

Anexo N° 3: Flow Sheet de circuito de flotación de cobre

Fuente: Elaboración Propia

Anexo N° 4: Análisis del mineral ley de cabeza



INFORME DE ENSAYO CM2024-3605

A SOLICITUD:	SUYEN CONDORI SENCIA
POR CUENTA DE:	SUYEN CONDORI SENCIA
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Mineral Sulfurado.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Reconocimiento Au-Ag,Cu total, Pb
CANTIDAD DE MUESTRAS:	01 Muestra.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En bolsa de plástico.
	Código: SUYEN
FECHA DE RECEPCION:	15-01-2024
FECHA DE REPORTE:	16-01-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO:	CMP - 09-DETERMINACION DE Au-Ag POR FUNDICION - COPELACION DE MUESTRAS DE EXPLORACION CMP -04-DETERMINACION DE ANALISIS DE MINERALES POR DIGESTION DE TRES ACIDOS-AAS CMP-06-DETERMINACION DE Pb
-------------------------	--

DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Au	Ag	Cu	Pb
	METODO	CMP-09	CMP-04	CMP-01	CMP-06
	UNIDAD	Oz/Tc	Oz/Tc	%	%
	NEWMONT	Ley de Au	Ley de Ag	Ley de Cu	Ley de Pb
SUYEN	Mineral Au-Ag-Cu	0.088	1.610	1.20	8

Notas de almacenaje:

Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.

CONTROL MINERALS S.A.C.

Ing. Moisés Mejía Yta
 Jefe de Laboratorio Químico
 CIP: 187812

Anexo N° 5: Resultado de Análisis Químico de concentrados de Cobre



**CONTROL
MINERALS**

INFORME DE ENSAYO
CM2024-3622

A SOLICITUD:	SUYEN CONDORI SENCIA.
POR CUENTA DE:	SUYEN CONDORI SENCIA.
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Concentrado de Cobre.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Volumetría de Cu.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	08 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En frasco de plástico.
	Código: CONCENTRADO 1 –ROUGHER 8
FECHA DE RECEPCION:	03-04-2024
FECHA DE REPORTE:	04-04-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO: CMP-01-DETERMINACION DE Cu POR VOLUMETRIA

DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Cu
	METODO	CMP-01
	UNIDAD	%
	NEWMONT	Ley de Cu
C1 CONCENTRADO 1	Concentrado Cu	15.38
C2 CONCENTRADO 2	Concentrado Cu	16.62
C3 CONCENTRADO 3	Concentrado Cu	14.88
C4 CONCENTRADO 4	Concentrado Cu	15.39
C5 CONCENTRADO 5	Concentrado Cu	15.20
C6 CONCENTRADO 6	Concentrado Cu	11.54
C7 CONCENTRADO 7	Concentrado Cu	13.20
C8 CONCENTRADO 8	Concentrado Cu	12.54

Notas de almacenaje:

Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.

CONTROL MINERALS S.A.C.

Ing. Moisés Mejía Yio
 Jefe de Laboratorio Químico
 CIP: 187812

Anexo N° 5: Resultado de Análisis Químico de concentrados centrales



**CONTROL
MINERALS**

INFORME DE ENSAYO
CM2024-3623

A SOLICITUD:	SUYEN CONDORI SENCIA.
POR CUENTA DE:	SUYEN CONDORI SENCIA.
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Concentrado de Cobre.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Volumetría de Cu.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	03 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En frasco de plástico.
	Código:CONCENTRADO 1 – ROUGHER 3
FECHA DE RECEPCION:	03-04-2024
FECHA DE REPORTE:	04-04-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO: CMP-01-DETERMINACION DE Cu POR VOLUMETRIA

DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Cu
	METODO	CMP-01
	UNIDAD	%
	NEWMONT	Ley de Cu
PC1 CONCENTRADO CENTRAL 1	Concentrado Cu	15.12
PC2 CONCENTRADO CENTRAL 2	Concentrado Cu	15.45
PC3 CONCENTRADO CENTRAL 3	Concentrado Cu	15.87

Notas de almacenaje:

Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.

CONTROL MINERALS S.A.C.

Ing. Moisés Mejía Yto
Jefe de Laboratorio Químico
CIP: 187612

Anexo N° 6: Resultado de Análisis Químico de concentrados de Cobre en flotación selectiva



**CONTROL
MINERALS**

INFORME DE ENSAYO
CM2024-3624

A SOLICITUD:	SUYEN CONDORI SENCIA.
POR CUENTA DE:	SUYEN CONDORI SENCIA.
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Concentrado de Cobre.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Volumetría de Cu.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	08 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En frasco de plástico.
FECHA DE RECEPCION:	Código: CONCENTRADO 1 –CLEANER 8
FECHA DE REPORTE:	03-04-2024
	04-04-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO: CMP-01-DETERMINACION DE Cu POR VOLUMETRIA

DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Cu
	METODO	CMP-01
	UNIDAD	%
	NEWMONT	Ley de Cu
C1 CONCENTRADO 1	Concentrado Cu	20.47
C2 CONCENTRADO 2	Concentrado Cu	24.34
C3 CONCENTRADO 3	Concentrado Cu	22.36
C4 CONCENTRADO 4	Concentrado Cu	25.21
C5 CONCENTRADO 5	Concentrado Cu	20.34
C6 CONCENTRADO 6	Concentrado Cu	21.97
C7 CONCENTRADO 7	Concentrado Cu	21.30
C8 CONCENTRADO 8	Concentrado Cu	25.87

Notas de almacenaje:
Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.

CONTROL MINERALS S.A.C.

Ing. Moisés Mejía Yta
Jefe de Laboratorio Químico
CIP: 157512

Anexo N° 7: Análisis químico de concentrado bulk del elemento plomo



INFORME DE ENSAYO
CM2024-3229

A SOLICITUD:	SUYEN CONDORI SENCIA.
POR CUENTA DE:	SUYEN CONDORI SENCIA.
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Concentrado bulk (Cu-Pb)
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Volumetría de Pb.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	08 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En frasco de plástico. Código: ROUGHER 1 – 8
FECHA DE RECEPCION:	03-04-2024
FECHA DE REPORTE:	04-04-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO: CMP-01-DETERMINACION DE Pb POR VOLUMETRIA

DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Pb
	METODO	CMP-01
	UNIDAD	%
	NEWMONT	Ley de Cu
C1 CONCENTRADO 1	Concentrado Pb	11.01
C2 CONCENTRADO 2	Concentrado Pb	7.31
C3 CONCENTRADO 3	Concentrado Pb	6.51
C4 CONCENTRADO 4	Concentrado Pb	6.01
C5 CONCENTRADO 5	Concentrado Pb	5.90
C6 CONCENTRADO 6	Concentrado Pb	6.21
C7 CONCENTRADO 7	Concentrado Pb	5.00
C8 CONCENTRADO 8	Concentrado Pb	6.70

Notas de almacenaje:
Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.



CONTROL MINERALS S.A.S.
Ing. Molinda Mejía Yru
Jefe de Laboratorio Químico
CIP. 161912

Mza. C Lote. 8 Apto. San Fernando (Alhara Grillo - Primas Socaboya) Arequipa-Arequipa
Móvil: 940108691 / clientes@controlminerals.com.pe

Anexo N° 7: Análisis químico de concentrado bulk de elemento plomo como centrales



INFORME DE ENSAYO
CM2024-3229

A SOLICITUD:	SUYEN CONDORI SENCIA.
POR CUENTA DE:	SUYEN CONDORI SENCIA.
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Concentrado de Bulk (Cu-Pb).
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Volumetría de Pb.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	03 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En frasco de plástico. Código: ROUGHER CENTRAL 1 - 3
FECHA DE RECEPCION:	03-04-2024
FECHA DE REPORTE:	04-04-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO:

CMP-01-DETERMINACION DE Pb POR VOLUMETRIA

DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Pb
	METODO	CMP-01
	UNIDAD	%
	NEWMONT	Ley de Cu
PC1 CONCENTRADO CENTRAL 1	Concentrado Pb	5.65
PC2 CONCENTRADO CENTRAL 2	Concentrado Pb	7.10
PC3 CONCENTRADO CENTRAL 3	Concentrado Pb	5.35

Notas de almacenamiento:
Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.



CONTROL MINERALS S.A.C.
Ing. Mónica Mejía Ysa
Jefe de Laboratorio Químico
CIP: 161612

Mza. C.Lota, 8 Apto. San Fernando (Almora Galla- Princesa Socobaya) Arequipa-Arequipa.
Móvil: 940108691 / cliente@controlminerals.com.pe

**Anexo N° 7: Etapas de muestreo conminución del material a procesar-
UNSAAC**



- Muestreo del mineral del yacimiento minero Pampacancha.



- Conminución del mineral en el laboratorio de procesamiento de minerales UNSAAC.



- Molienda a tiempos diferentes
- Preparación de pulpa para las pruebas de flotación bulk



- Condicionamiento de la pulpa y dosificación del los reactivo Bicromato de sodio.



- Flotación de cobre por espumas en las celda Denver.



- Resultados obtenidos de las pruebas de flotación en pulpa.
- Resultados obtenidos para hacer el vio en frascos al laboratorio para su respectivo análisis.
- Plateado del concentrado de cobre en la etapa final en la flotación CLEANER

