UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA

TESIS

FLOTACIÓN BULK DE MINERALES POLIMETÁLICOS DEL PROYECTO MINERO PERUMING PANA – PUNO, LAMPA, PARATIA – 2024

PRESENTADO POR:

Br. AZUCENA CONCEPCION HUAMAN ARMINTA

Br. MARIA DEL CARMEN YABAR HUAMAN

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO.

ASESOR:

Ing. PORFIRIO CARRASCO TAPIA

CUSCO – PERÚ

2025

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Ing. Porfirio Carrasco Tapia quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: "Flotación Bulk de minerales polimetálicos del Proyecto Minero Peruming Pana-Puno, Lampa Paratia - 2024"

Presentado por: Azucena Concepción Huaman Arminta DNI N° 75991107;
presentado por: Maria del Carmen Yabar Huaman DNI N°: 72015040
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Metalúrgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8 **%.**

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 sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

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

Cusco, 16 de enero de 20 26

Firma
Post firma Porfirio Carrasco T.
Nro. de DNI 24002581
ORCID del Asesor 0000-0002-4360-9866

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:546873899

FLOTACION BULK DE MINERALES POLIMETALICOS DEL PROYECTO MINERO PERUMING PANA -PUNO, LAMPA. PARAT...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:546873899

Fecha de entrega
16 ene 2026, 4:22 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
16 ene 2026, 4:27 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
FLOTACION BULK DE MINERALES POLIMETALICOS DEL PROYECTO MINERO PERUMING PANA -PU....pdf

Tamaño del archivo
1.6 MB

146 páginas

24.892 palabras

142.605 caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Fuentes principales

7%	Fuentes de Internet
1%	Publicaciones
5%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Caracteres reemplazados
31 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Distinguido señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, de Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores miembros del jurado:

En cumplimiento de los requisitos establecidos para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, y en conformidad con lo dispuesto en los lineamientos suscritos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, sometemos a su apreciación nuestra tesis intitulada:

"FLOTACIÓN BULK DE MINERALES POLIMETÁLICOS DEL PROYECTO MINERO PERUMING PANA – PUNO, LAMPA, PARATIA – 2024"

El objetivo de la presente investigación es realizar el proceso de flotación bulk para el mineral polimetálico del proyecto minero PERUMING PANA, para que mediante este proceso se pueda obtener concentrados de plomo (Pb) y plata (Ag) que se presentan con mayor ley para su posterior comercialización.

Esperando que nuestro trabajo de investigación sea valorado como un aporte hacia el área de estudios ya mencionada, para el ámbito metalúrgico y para el Proyecto Minero PERUMING PANA.

Atentamente;

Bach. HUAMAN ARMINTA, Azucena Concepción

Bach. YABAR HUAMAN, Maria del Carmen

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgencita del Carmen y del Rosario por cada una de sus bendiciones, por darme la oportunidad de bendecirme brindándome un nuevo amanecer día a día y así seguir cumpliendo cada uno de mis sueños y mis metas.

A mi Madre Graciela Huamán Cárdenas, gracias por ser mi guía y mi soporte, por brindarme tu amor, apoyo absoluto y paciencia en todo este proceso, por tenderme siempre su mano y no soltarme nunca.

A mi Padre Enrique Yabar Farfán, por consentirme y apoyarme haciendo mil esfuerzos para que yo y mi hermano podamos salir adelante. Por todo su incondicional amor, su apoyo afectuoso y por brindarme su brazo para sostenerme y no rendirme.

A mi hermano Luis Enrique, mi mejor amigo, y compañero de batallas, agradecerte por la fuerza y el apoyo moral impartido diariamente.

A mi Marujita Farfán por ser un grandioso ser humano con sus nietos, por apoyarme y brindarme su mano en los momentos que más necesité, por quererme siempre. A mi tía María y mis primos - hermanos mis compañeros de alegrías y tristezas.

A todos mis tios y primos por alentarme para poder seguir cumpliendo esta meta, a mi tia Ernestina, a mi tio Nacho y a mi tio Anibal que siempre esperaron este momento y sé que ahora en el cielo están felices de verme cumplir una meta más.

A todas las personas que me quieren, me estiman y me consideran como una hija, a cada docente de la E.P. Ingeniería Metalúrgica por los conocimientos brindados en sus aulas y en mi formación profesional.

MARIA DEL CARMEN YABAR HUAMAN

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme y brindarme esa fuerza para poder seguir. Principalmente agradecida con Dios, padre celestial, por darme la gran familia que tengo ahora.

A mi Madre Norma Arminta Ramos, por su paciencia, apoyo incondicional y amor eterno. Te agradezco por haber criado una mujer igual de fuerte que tú. Mi mayor motivación para lograr mis metas siempre será ella, mi gran ejemplo de fortaleza y resiliencia.

A mi Padre Nicanor Huaman Auccaillo, por su apoyo incondicional sobre todo en los difíciles momentos de mi vida. Por su paciencia y amor eterno a pesar del carácter difícil que tiene su hija. Siempre estaré agradecida con él, mi mayor ejemplo de nobleza y humildad.

A mi hermanito menor Diego Marcelo, mi deber con él siempre ha sido darle el mejor ejemplo y enseñarle que las metas y sueños se logran con dedicación y esfuerzo. No olvides que tu hermana mayor te ama incondicionalmente.

AZUCENA CONCEPCIÓN HUAMAN ARMINTA

AGRADECIMIENTO

Manifestamos nuestro sincero agradecimiento y gratitud a los propietarios del proyecto minero PERUMING PANA por brindarnos el acceso, las facilidades y el apoyo necesario para poder realizar el presente trabajo.

A nuestra amada alma mater la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco a cada uno de los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por el apoyo, aliento, orientación y formación académica e integral.

Expresar nuestro reconocimiento y admiración a nuestro Asesor de Tesis Ing. Porfirio Carrasco Tapia, docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por su apoyo continuo, su compromiso, guía y orientación en el proceso de desarrollo de nuestro trabajo de investigación.

INDICE

PRESENTACIÓN **1**
DEDICATORIA **2**
DEDICATORIA **3**
AGRADECIMIENTO **4**
ÍNDICE DE FIGURAS **10**
ÍNDICE DE TABLAS **11**
SIGLAS Y ABREVIATURAS **13**
RESUMEN **16**
ABSTRACT **17**
INTRODUCCIÓN **18**
CAPITULO I **20**
METODOLOGÍA DEL ESTUDIO **20**
1.1. Planteamiento del Problema 20
1.2. Formulación del Problema 21
1.2.1. Problema General 21
1.2.2. Problema Específico 21
1.3. Justificación 21
1.3.1. Conveniencia 21
1.3.2. Relevancia Social 22
1.3.3. Relevancia Tecnológica 22
1.3.4. Valor Teórico 23
1.3.5. Utilidad Metodológica 23
1.4. Objetivos de la Investigación 23
1.4.1. Objetivo General 23
1.4.2. Objetivos Específicos 24
CAPITULO II **25**
FUNDAMENTACIÓN TEORICA **25**
2.1. Antecedentes de la Investigación 25
2.1.1. Antecedentes Internacionales: 25
2.1.2. Antecedentes Nacionales 26
2.2. Mineral. 28
2.3. Minerales Polimetálicos 29
2.3.1. Minerales Hidrofílicos 29

2.3.2. Minerales Hidrofóbicos 30
2.4. Flotación.....31
2.4.1. Etapas del Proceso de Flotación 32
2.4.2. Factores que Intervienen en la Flotación.....33
2.5. Reactivos de flotación 37
2.5.1. Colectores 38
2.5.2. Espumantes.....40
2.5.3. Reguladores o acondicionadores. 42
2.5.4. Tipos de Reactivos a utilizar en el proceso de flotación bulk 43
2.6. Tipos de Flotación.....47
2.6.1. Tipos de Flotación por Espumas 47
2.6.2. Flotación bulk o colectiva 49
2.6.3. Flotación diferencial o selectiva.....50
2.6.4. Fases en la flotación 51
2.7. Interfases de la flotación 52
2.7.1. Interfase gas – liquido G-L.....53
2.7.2. Interfase solido- líquido S-L.....53
2.8. Termodinámica de las interfases.....54
2.8.1. Tensión superficial 54
2.8.2. Superficies de Sólidos 55
2.8.3. Adsorción 55
2.8.4. Potencial Electroquímico.....57
2.8.5. Potencial Electrocinético 58
2.9. Contacto de Tres Fases.....59
2.10. Ángulo de contacto 62
2.11. Cinética de la flotación.....63
2.11.1. Modelo empírico 64
2.11.2. Modelo semi empírico.....64
2.11.3. Modelo Analógico.....66
2.11.4. Modelo Analítico.....67
CAPITULO III.....68
HIPÓTESIS Y VARIABLES.....68
3.1. Hipótesis.....68
3.1.1. Hipótesis General.....68
3.1.2. Hipótesis Específica.....68

3.2. Variables 68
3.2.1. Variables Independientes 68
3.2.2. Variables Dependientes....69
3.3. Indicadores 69
3.4. Operacionalización de Variable 69
CAPITULO IV....71
METODOLOGIA....71
4.1. Ámbito de Estudio....71
4.1.1. Información de la Empresa 71
4.1.2. Ubicación Geográfica del Proyecto Minero PERUMING PANA....71
4.2. Accesos y Distancias....72
4.3. Tipo, Nivel o Método de la Investigación....73
4.3.1. Tipo de Investigación....73
4.3.2. Nivel de Investigación 73
4.3.3. Método de la Investigación....73
4.4. Diseño de la Investigación 73
4.5. Población y Muestra....74
4.5.1. Población 74
4.5.2. Muestra 74
4.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección....74
4.6.1. Técnicas 74
4.7. Materiales, Instrumentos y Equipos de Investigación....75
4.7.1. Materiales de Investigación 75
4.7.2. Instrumentos de Investigación 75
4.7.3. Reactivos de Flotación....75
4.7.4. Equipos 76
4.8. Viabilidad....76
CAPITULO V....77
ANÁLISIS Y RESULTADOS....77
5.1. Procedimiento Experimental....77
5.2. Preparación Mecánica de minerales (Muestreo de mineral)....78
5.2.1. Chancado primario 78
5.2.2. Molienda....78
5.2.3. Homogenizado y Cuarteo....78
5.2.4. Análisis Químico del Mineral de Cabeza y Caracterización de la Muestra

del Mineral 79
5.3. Caracterización del Mineral de Cabeza 80
5.4. Determinación de la Gravedad Especifica del Mineral 81
5.5. Cinética de molienda 83
5.5.1. Tiempo de Molienda 83
5.6. Desarrollo Experimental de la Flotación Bulk Pb-Ag 85
5.7. Materiales, reactivos y equipos 86
5.7.1. Materiales 86
5.7.2. Reactivos 87
5.7.3. Equipos 87
5.8. Procedimiento Experimental 87
5.9. Preparación de la Pulpa para la flotación 88
5.10. Dosificación de Reactivos 89
5.11. Cálculos de consumos de reactivos de flotación a escala de laboratorio 90
5.12. Pruebas de Experimentación de Flotación Bulk en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales 93
5.12.1. Prueba de Flotación N°1 93
5.12.2. Prueba de Flotación N°2 94
5.12.3. Prueba de Flotación N°3 95
5.12.4. Prueba de Flotación N°4 96
5.12.5. Prueba de Flotación N°5 97
5.12.6. Prueba de Flotación N°6 98
5.12.7. Prueba de Flotación N°7 99
5.12.8. Pruebas de Flotación N°8 100
5.12.9. Prueba de Flotación N°9 101
5.12.10. Prueba de Flotación N°10 102
5.12.11. Prueba de Flotación N°11 103
CAPITULO VI 107
ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 107
6.1. Planificación de Análisis Estadísticos 107
6.2. Resultados de las Pruebas Metalúrgicas 108
6.3. Variables Consideradas 108
6.4. Hipótesis de interés a verificar 109
6.5. Estimación de Coeficiente de Regresión Lineal 110
6.6. Medida de Coeficiente de Determinación R^2 112

6.7. Prueba de hipótesis ANOVA 114
6.8. Interpretación de gráficas del diseño factorial 117
6.8.1. Diagrama Pareto y Efectos principales para el porcentaje de recuperación de Plomo y Plata..... 117
6.8.2. Gráfica de efectos principales para él % de recuperación de Pb 118
6.8.3. Gráfica de contorno % recuperación Pb 119
6.8.4. Gráfico de cubos de % Recuperación de Pb 120
6.8.5. Gráfica de Optimización 121
CONCLUSIONES..... 123
RECOMENDACIONES..... 125
BIBLIOGRAFÍA..... 127
ANEXOS..... 130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mineral Polimetálico del Proyecto Minero PERUMING PANA 29
Figura 2 Representación de las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas durante el proceso de flotación 31
Figura 3 Proceso de flotación en beneficio de minerales 32
Figura 4 Corte transversal de una celda de flotación para indicar las diferentes zonas 33
Figura 5 Influencia del pH en la flotación de distintos minerales 43
Figura 6 Esquema de flotación diferencial o estándar 48
Figura 7 Esquema de flotación inversa 49
Figura 8 Esquema de la flotación Bulk o colectiva 50
Figura 9 Esquema de la flotación diferencial o selectiva 51
Figura 10 Interpretación esquemática del origen de la tensión superficial 53
Figura 11 Interpretación de la interfase sólida -líquida 54
Figura 12 Interpretación del fenómeno de Adsorción 57
Figura 13 Representación gráfica del contacto de tres fases 60
Figura 14 Esquema del ángulo de contacto 62
Figura 15 Ubicación del Proyecto Minero PERUMING PANA 72
Figura 16 Secuencia de Procedimiento Experimental 77
Figura 17 Análisis Mineralógico de la Muestra 81
Figura 18 Determinación de la Gravedad Específica 82
Figura 19 Gráfico de Cinética de Molienda 84
Figura 20 Diagrama de Flujo de pruebas de flotación 86
Figura 21 Dosificación de Reactivos 90
Figura 22 Gráfico de barras del % de Recuperación Pb/Ag vs. Ley de Pb/Ag 106
Figura 23 Diagrama de Pareto de efectos para el porcentaje de Recuperación de Pb. 117
Figura 24 Diagrama de Pareto de efectos para el porcentaje de Recuperación de Ag 118
Figura 25 Gráfico de Efectos principales para la Recuperación de Pb (%) 119
Figura 26 Gráfica de contorno de % de Recuperación Pb vs. Ph; Z-11 120
Figura 27 Gráfica de cubos (medias ajustadas) de % de recuperación de Pb 121
Figura 28 Gráfica de Optimización del % de recuperación de Pb, Ag 122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes de una pulpa.....34
Tabla 2 Colectores más utilizados y sus aplicaciones.....40
Tabla 3 Operacionalización de Variables 70
Tabla 4 Rutas de acceso al Proyecto Minero PERUMING PANA 72
Tabla 5 Análisis Químico de Mineral polimetálico 80
Tabla 6 Determinación de la Gravedad Especifica.....83
Tabla 7 Determinación del porcentaje - 200 Mallas de las pruebas de molienda.....84
Tabla 8 Preparación de Pulpa 89
Tabla 9 Dosificación de Reactivos 91
Tabla 10 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 94
Tabla 11 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°1.....94
Tabla 12 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 95
Tabla 13 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°2.....95
Tabla 14 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 96
Tabla 15 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°3.....96
Tabla 16 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 97
Tabla 17 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°4.....97
Tabla 18 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 98
Tabla 19 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°5.....98
Tabla 20 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 99
Tabla 21 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°6.....99
Tabla 22 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 100
Tabla 23 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°7.....100
Tabla 24 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 101
Tabla 25 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°8.....101
Tabla 26 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 102
Tabla 27 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°9.....102
Tabla 28 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 103
Tabla 29 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°10.....103
Tabla 30 Condiciones Operativas para Flotación Bulk 104
Tabla 31 Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°11.....104

Tabla 32 Recuperaciones y leyes de pruebas de flotación 105
Tabla 33 Plantilla de Diseño Experimental Codificada y Real 108
Tabla 34 Efectos estimados sobre el porcentaje de recuperación de plomo (Pb) en unidades codificadas 110
Tabla 35 Efectos estimados sobre el porcentaje de recuperación de plata (Ag) en unidades codificadas 111
Tabla 36 Coeficientes del Modelo de Regresión Recuperación de Pb 113
Tabla 37 Coeficiente del modelo de Regresión Recuperación de Ag 114
Tabla 38 Análisis de variaciones ANOVA (% Recuperación de Pb) 115
Tabla 39 Análisis de varianza ANOVA (Recuperación de Ag) 116
Tabla 40 Cuadro de dosificación de Reactivos 144

SIGLAS Y ABREVIATURAS

Pb	: Plomo
Zn	: Zinc
Au	: Oro
Ag	: Plata
Fe	: Hierro
µm	: Micrones
pH	: Potencial Electroquímico
Kg	: Kilogramos
cc	: Centímetro Cúbico
AO	: American Optical
ml	: Mililítro
%S	: Porcentaje de Sólidos
t/m^3	: Tonelada por metro cúbico
g/t	: Gramos por tonelada
g/cc	: gramos por centímetros cúbicos
Z11	: Ciantato Isopropílico de Sodio
SEM	: Scanning Electron Microscopy
AP-3418	: Aerophine 3418
AP-31	: Aerophine 31
AR-242	: Aeroflat 242
V	: Volumen
V_l	: Volumen Líquido
V_s	: Volumen Sólido
P	: Peso
P_l	: Peso Líquido
P_s	: Peso de sólido
d	: densidad
d_l	: densidad líquida

d_s : densidad sólida

D : Dilución

m : Masa de mineral

R : Recuperación

L : Litros

PSI : Libras por Pulgada Cuadrada

C : Concentración

P : Presión

Pa : Presión Absoluta

T : Temperatura

E : Intensidad de Campo Eléctrico

gr : Gramos

min : Minutos

$ZnSO_4$: Sulfato de Zinc

NaCN : Cianuro de Sodio

MIBC : Metil Isobutil Carbinol

Na_2CO_3 : Carbonato de Sodio

G – L : Gas – Líquido

S – L : Sólido – Líquido

G_s : Energía Libre Superficial

γ : Tensión Superficial

φ : Viscocidad

t : tiempo

SPb : Galena

SCuFe : Calcopirita

ZnS : Esfalerita

Ge : Gravedad Específica

RPM : Revoluciones por Minuto

DOE : Diseño de Experimentos

H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alterna

E.E. : Efectos Estimados

R^2 : Coeficiente de Determinación

ANOVA : Análisis de Varianza

RESUMEN

El proyecto minero PERUMING PANA situado en la región Puno, se encuentra en etapa de exploración, evaluación geológica y estimación de reservas minerales. Previamente a las pruebas experimentales, se realizó el análisis mineralógico y químico de leyes del mineral polimetálico. Los resultados mostraron contenidos de plomo (10,13 %), zinc (9,6 %), oro (0,904 g/t) y plata (35 g/t), evidenciando leyes relativamente altas y confirmando el potencial económico del recurso. Con base a esta información el propósito fue evaluar a nivel laboratorio el proceso de flotación bulk aplicado a este mineral polimetálico, priorizando la recuperación de Pb y Ag como especies de mayor interés. Por ello, se desarrollaron pruebas metalúrgicas donde se analizaron variables operativas significativas, como pH, porcentaje de sólidos y dosificación del reactivo Z-11. En la primera etapa se estandarizó la granulometría de molienda, obteniendo como condición óptima un 60 % -200 malla Tyler, con una gravedad específica de 2,86 g/cc. Los resultados de las pruebas metalúrgicas demostraron que el proceso bulk permitió obtener concentrados de Pb-Ag, bajo condiciones operativas. La dosificación del colector Z-11 es de 4,60 cc, el pH óptimo se situó entre 8 y 9, y el porcentaje de sólidos más eficiente fue de 20%. Bajo estas condiciones se alcanzaron promedios de recuperación de 80% de Pb y 70% de Ag, donde la recuperación de Pb fue superior a la Ag. El estudio generó información relevante para la definición de un proceso adecuado de beneficio de estos minerales.

Palabras clave: Flotación bulk, Mineral polimetálico, Recuperación, Especies.

ABSTRACT

The PERUMING PANA mining project, located in the Puno region, is currently in the exploration, geological evaluation, and mineral reserve estimation phase. Prior to experimental testing, mineralogical and chemical analysis of the polymetallic ore grades was performed. The results showed lead (10.13%), zinc (9.6%), gold (0.904 g/t), and silver (35 g/t) content, indicating relatively high grades and confirming the resource's economic potential. Based on this information, the objective was to evaluate the bulk flotation process applied to this polymetallic ore at the laboratory level, prioritizing the recovery of Pb and Ag as the species of greatest interest. Therefore, metallurgical tests were conducted to analyze significant operating variables such as pH, solids percentage, and Z-11 reagent dosage. In the first stage, the grinding particle size was standardized, achieving an optimum condition of 60% -200 Tyler mesh, with a specific gravity of 2.86 g/cc. The results of the metallurgical tests demonstrated that the bulk flotation process yielded Pb-Ag concentrates under specified operating conditions. The dosage of the Z-11 collector was 4.60 cc, the optimum pH was between 8 and 9, and the most efficient solids percentage was 20%. Under these conditions, average recovery rates of 80% for Pb and 70% for Ag were achieved, with Pb recovery exceeding Ag recovery. The study generated relevant information for defining a suitable beneficiation process for these minerals.

Keywords: Bulk flotation, Polymetallic ore, Recovery, Species

INTRODUCCIÓN

Nuestro Perú es uno de los tantos países con diversos yacimientos mineros que presentan en su composición minerales de oro, plata, zinc, plomo, entre otras especies, que se presentan tanto de manera mineralógica sulfuradas como óxidos. En el sur del Perú encontramos muchos de estos yacimientos mineros, donde varios de ellos se encuentran iniciando labores de exploración para su próxima extracción y luego iniciar con su proceso de obtención.

Uno de los métodos para la obtención de concentrados es aplicar la flotación como método de concentración para la recuperación de metales valiosos, proceso por el cual separamos al mineral valioso conocido como “mena”, del mineral estéril llamado “ganga”, teniendo muy en cuenta las condiciones operativas, granulometría y sus propiedades superficiales.

El Proyecto Minero PERUMING PANA, como inicio de sus operaciones de exploración, extrae de sus cuatro betas minerales polimetálicos de plomo, zinc, plata y oro, siendo el plomo y plata minerales que contienen mayor ley.

Este proyecto minero, que está ubicado en la región de Puno, provincia de Lampa y distrito de Paratia, enfrenta la necesidad de no tener una planta de procesamiento ni mucho menos un proceso óptimo para la obtención y posterior recuperación de estas especies, donde al hacer el estudio mineralógico de los minerales extraídos de sus betas, se recuperará los minerales de Pb – Ag ya que estos se encuentran en altas concentraciones, es por ello que se propone realizar el desarrollo del proceso de flotación bulk para las especies del Pb – Ag, con el fin de recuperar en un solo proceso ambos minerales y a su vez obtener concentrados con una ley relativamente alta, dándole así un valor agregado y una posterior comercialización.

Para ello primeramente se inicia con la identificación de las sustancias presentes en el mineral para luego pasar por el muestreo representativo y posteriormente para empezar a realizar el preparado del mineral y poder desarrollar pruebas metalúrgicas con los distintos reactivos a utilizar para la evaluación de su dosificación.

En el capítulo I se estableció la problemática relacionada a la obtención por el proceso de flotación bulk del mineral Pb – Ag, donde se determinó los objetivos y se identificó los parámetros para la recuperación de estos minerales, dando como enfoques la dosificación de reactivos a utilizar, determinación del porcentaje de sólidos y establecimiento del pH. En el Capítulo II se elaboró las bases teóricas que se relacionan al trabajo y antecedentes relacionados a la metodología. Para el capítulo III se establecieron las hipótesis y se determinaron las variables presentes en el proceso de flotación bulk. En el capítulo IV se describió la metodología que se basa en el nivel de investigación cuantitativa, tecnológico y experimental. En el desarrollo del Capitulo V se describió el proceso y las prácticas en el proceso de flotación bulk, así también se da a conocer los resultados obtenidos. Por último, en el Capítulo VI se plasma la discusión de resultados, las conclusiones y recomendaciones para una mejora óptima.

CAPITULO I

METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento del Problema

En el Perú, la presencia de yacimientos polimetálicos es abundante y representa un sector estratégico para la economía minera del país. La explotación de estos recursos requiere de estudios metalúrgicos que permitan seleccionar y optimizar los procesos de concentración más adecuados, considerando las características mineralógicas y físicas propias de cada depósito.

En este contexto, el proyecto minero PERUMING PANA, ubicado en la región Puno, provincia de Lampa, distrito de Paratia, se encuentra en etapa de exploración y explotación de especies polimetálicas de plomo (Pb), zinc (Zn), oro (Au) y plata (Ag).

Actualmente, el proyecto solo dispone de análisis químicos y mineralógicos preliminares que evidencian que estos minerales presentan leyes relativamente altas, lo que confirma la existencia de un recurso con potencial económico. Sin embargo, la falta de estudios metalúrgicos y pruebas experimentales de concentración impide determinar un proceso de beneficio técnicamente viable y económicamente rentable. A esto se suma que el mineral extraído debe ser trasladado a otras plantas de procesamiento fuera de la zona, lo que incrementa los costos operativos y disminuye la rentabilidad del proyecto.

Por ello, se hace necesario investigar y evaluar, a nivel experimental, alternativas de procesamiento mediante flotación bulk de minerales polimetálicos. Este estudio permitirá definir condiciones operativas óptimas y determinar la recuperación posible de plomo y plata, constituyendo una base técnica que podría sustentar la futura instalación de una planta de procesamiento cercana a la explotación. Esto representaría ventajas en la

recuperación valiosa de plomo y plata, reducción de costos de transporte y mayor rentabilidad para los propietarios del proyecto.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo determinar, a nivel experimental, un proceso de flotación bulk que permita establecer condiciones operativas óptimas para la recuperación de plomo y plata (Pb–Ag) de los minerales polimetálicos del proyecto PERUMING PANA, y que constituya una base técnica para evaluar la viabilidad de instalar una planta de procesamiento en la zona de explotación?

1.2.2. Problema Específico

a) ¿Cuál es la dosificación adecuada del colector Z-11 para obtener una recuperación eficiente de plomo y plata en la flotación bulk de los minerales del proyecto PERUMING PANA?
b) ¿Cuál es el rango de pH más favorable para el desarrollo del proceso de flotación bulk de Pb–Ag?
c) ¿Qué porcentaje de sólidos permite obtener una recuperación eficiente de plomo y plata durante la flotación bulk?

1.3. Justificación

1.3.1. Conveniencia

El desarrollo de esta investigación permitirá evaluar, a nivel experimental, la flotación bulk de plomo y plata presentes en los minerales polimetálicos del proyecto minero PERUMING PANA. Se establecerán parámetros operativos adecuados, como pH,

porcentaje de sólidos y dosificación de reactivos, con el propósito de obtener concentrados de Pb y Ag con una recuperación eficiente.

De esta manera, el estudio aportará información técnica relevante para optimizar el aprovechamiento de los minerales del proyecto y constituirá una base de referencia para futuros estudios metalúrgicos y la posible instalación de una planta de procesamiento cercana a la zona de explotación.

1.3.2. Relevancia Social

Esta investigación beneficiará directamente a los propietarios del proyecto minero PERUMING PANA, al constituirse en una base técnica que podrá ser utilizada en la evaluación de una futura instalación de una planta de procesamiento cercana al área de explotación. Este aporte se traduce en un beneficio económico y social, ya que permitiría reducir costos asociados al transporte del mineral y, al mismo tiempo, generar oportunidades de empleo local, contribuyendo al desarrollo de la comunidad vinculada al proyecto.

1.3.3. Relevancia Tecnológica

La presente investigación representa un aporte al desarrollo tecnológico en el ámbito de la metalurgia extractiva, al enfocarse en la evaluación experimental de la flotación Bulk de plomo y plata a partir de minerales polimetálicos del proyecto PERUMING PANA. El uso de los recursos mineralógicos del yacimiento y de los medios disponibles en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica permite generar información aplicada que contribuye a resolver problemas propios de la pequeña minería. De esta manera, se busca establecer parámetros operativos que optimicen la

eficiencia de recuperación de especies polimetálicas, generando conocimientos que pueden ser utilizados como referencia en estudios posteriores.

1.3.4. Valor Teórico

El estudio busca generar un aporte al conocimiento sobre la flotación Bulk de minerales polimetálicos, en particular de plomo y plata, mediante ensayos experimentales realizados en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Los resultados obtenidos permitirán comprender mejor la influencia de este proceso en la recuperación de especies metálicas y reforzar los fundamentos teóricos relacionados con la concentración de minerales.

1.3.5. Utilidad Metodológica

La investigación refuerza el conocimiento teórico y práctico del proceso de flotación Bulk, ampliamente utilizado en la obtención de concentrados de minerales. A través de las pruebas experimentales, se busca interpretar y correlacionar las variables de operación, generando una base metodológica que pueda aplicarse en estudios similares de minerales polimetálicos.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Determinar, a nivel experimental, un proceso de flotación bulk que establezca condiciones operativas óptimas para la recuperación de plomo y plata (Pb–Ag) de los minerales polimetálicos del proyecto PERUMING PANA, constituyendo una base técnica para evaluar la viabilidad de instalar una planta de procesamiento en la zona de explotación.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar la dosificación adecuada del colector Z-11 para lograr la recuperación de plomo y plata en la flotación bulk de los minerales del proyecto PERUMING PANA.
- Establecer el rango de pH más favorable para el desarrollo del proceso de flotación bulk de Pb–Ag.
- Evaluar el porcentaje de sólidos que permita obtener una recuperación eficiente de plomo y plata durante la flotación bulk.

CAPITULO II

FUNDAMENTACIÓN TEORICA

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales:

En el trabajo de investigación de **(Sánchez Hernández, Recio S., & Sánchez L., 2022)** titulada ***"Optimización del proceso de flotación Pb-Zn por medio del sub-proceso de pre-flotación de especies carbonosas"*** , donde el objetivo es proponer un subproceso de pre – flotación para recuperar la materia carbonosa los minerales de Pb y Zn a partir de los minerales procesados de Pb, Cu y Zn. Durante la investigación se identificó que estos minerales se encuentran inicialmente con un problema en la determinación del valor de la concentración, así como no presentan una ley comercial y presentan recuperaciones bajas, por ende al presentar estos problemas, la cinética de flotación es lenta.

Como resultado en las mejoras de la cinética, se logró obtener el concentrado de Pb donde se presenta leyes mercantíles, así tambien se obtuvo la mejora en el grado de recuperación del mineral y una mejora en la recuperación y grado de los reactivos, pero para que se de esta recuperación es necesario disminuir la granulometría del mineral para la alimentación a la flotación.

(Pardave, 2020) en su trabajo titulado ***"Estudio de fisicoquímica de superficies de la flotación de minerales polimetálicos de la zona de California Santander"***, donde el objetivo de la presente es evaluar el potencial de la extracción del mineral polimetálico haciendo uso del proceso de flotación. En el desarrollo del trabajo se evaluaron el análisis macroscópico, caracterización física y química del mineral, análisis de secciones delgadas y microscopia SEM esto para determinar que elementos se encuentran presentes en la muestra. Donde al realizar las pruebas se verificó que el oro (Au) esta relacionado a la

pirita y a los sulfuros de cobre (Cu), haciendo uso del reactivo Xantato Isopropilico de sodio Z-11 se pudo verificar que es uno de los reactivos con mejor funcionamiento para determinar el ángulo de contacto para el proceso de flotación bulk donde se hizo la variación en la cantidad de reactivos, porcentaje de sólidos y tamaños de partícula diferentes.

Como resultados se obtuvo que al aumentar el porcentaje de sólidos, variar los tamaños de partícula y aumentar la cantidad de reactivo se obtiene un porcentaje de recuperación de oro de hasta 68% y de plata hasta 82,6%, así mismo, para la obtención de concentrados de cobre y piritas auríferas se planteó un circuito Rougher – cleaner y Scavenger.

En el trabajo doctoral, realizado por **(Boland, 2014)** titulado "***Una investigación del rendimiento del circuito de flotación de plomo en una concentradora polimetálica"***, el objetivo principal fue investigar y optimizar el rendimiento del circuito de flotación de plomo en una concentradora polimetálica (Pb-Ag-Zn) a escala industrial, con foco en la recuperación de plata. La metodología se basó en la caracterización mineralógica avanzada mediante QEMSCAN y en un extenso balance de masas, complementado con pruebas de laboratorio para estudiar el impacto de la dosificación de reactivos y el control de la pulpa. La conclusión principal fue que las pérdidas de plata y la baja selectividad se debían a problemas de sobre molienda de partículas de Pb-Ag y a la activación de sulfuros de hierro (pirita), sugiriendo que un régimen de reactivos optimizado y un mejor control del pH eran esenciales para mejorar la recuperación de Ag en el concentrado de plomo.

2.1.2. Antecedentes Nacionales:

(Quispe, 2024) en su trabajo de investigación titulado ***"Optimización de la flotación bulk para mejorar la recuperación de plata y plomo en la planta***

concentradora sociedad minera Andereal S.A.C.”, cuyo objetivo es optimizar el proceso de flotación bulk para realizar una mejora en la recuperación de plomo y plata. En la investigación se identificaron problemas de baja recuperación de Pb – Ag al usar el reactivo colector AP-3418 haciendo de que la recuperación de plomo sea de 73.41% y el de la plata sea 54.17%, la metodología a utilizar fue de enfoque experimental y cuantitativo a nivel descriptivo. Al realizar diferentes tipos de etapas de flotación se logró determinar la concentración y dosificación del reactivo AP-31 que se usará en reemplazo del reactivo colector AP-3418.

Como conclusión, se obtuvo un incremento considerable en los resultados obtenidos para el plomo y plata mediante el proceso de flotación bulk. Al utilizar el reactivo AP-31, se recuperó la plata al 80.33% y el plomo al 81.48%.

(Valverde, Aramburú, Ortiz, Tiburcio, & Aguilar, 2024) en su artículo de investigación titulado ***“Optimización de recuperación de Pb-Ag del proceso de flotación mediante la caracterización mineralógica de mineral polimetálico de la sierra norte del Perú”***, donde el objetivo fue optimizar la tasa de recuperación de plomo – plata (Pb – Ag) mediante el proceso de flotación de minerales extraídos de tres bocaminas (Esmeralda, Orión y Hércules), haciendo uso de los reactivos AP-3418, AR-404. AR-242. Para el mineral extraído de la bocamina Esmeralda se utilizó una dosificación de 18 g/l de mezcla (AP-3418/AR-404), 5 g/t de AR-242 con un pH óptimo de 11.5 donde se permitió recuperar un 81.99% de plomo con una calidad de 58.66% y 83.79% de plata con una calidad de 310.64 oz/t. Para la bocamina Orión, se utilizó la dosificación de 30 g/l de mezcla (AP-3418/AR-404), 5 g/t de AR-242 con un pH óptimo de 10.5 que permitió recuperar el 81.71% de plomo con un grado de 61,6% y 81.24% de plata con una ley de 85.39 oz/t, donde se alcanzaron valores óptimos; en cambio para la bocamina Hércules

se hizo el uso de la dosificación en cantidad de 30 g/t de mezcla (AP-3418/AR-404), 15 g/t de AR-242 con un pH óptimo de 11.5 que permitió recuperar el 82.4% de plomo con un grado de 54,12% y 80.88% de plata con una ley de 62.63 oz/t.

En conclusión, se obtuvieron recuperaciones relativamente altas con leyes para el plomo y plata considerablemente óptimas.

En el trabajo de **(Huallpa Antoniete, 2018),** titulado ***"Concentración por Flotación de Minerales Sulfurados: Plata, Plomo, Cobre, Zinc y Oro en Minerales Polimetálicos"***, siendo el objetivo general el de recuperar minerales con valiosos valores de cobre, zinc, plomo, plata y oro, mediante el uso de diferentes tipos de flotación en dicho procedimiento (flotación Zn, flotación bulk y para la recuperación de Cu-Pb haciendo uso de la flotación diferencial), para que mediante este desarrollo se pueda obtener en forma concentrados de los minerales de cobre, zinc y plomo. Donde se realizó un estudio granulométrico de mineral en las tres etapas de flotación que oscilan entre el 58% - 200 mallas, los parámetros a tomar en cuenta fueron la administración de reactivos, pH, el tiempo de molienda y el balance metalúrgico de cada prueba.

Como conclusión se tiene que en la primera prueba la flotación Bulk es favorable para la obtención de Pb, Cu, Ag y Zn, en caso del Oro la recuperación oscila del 56 – 79%, también nos da a conocer que mediante la realización de las pruebas por los diferentes métodos de flotación (flotación bulk, flotación zinc y flotación diferencial) se llega a obtener Pb y Cu de mayor calidad comercial.

2.2. Mineral.

Es una sustancia natural que se presenta inorgánicamente, constituida por un sólido homogéneo que se forma a través de procesos geológicos. Posee una composición

química y una estructura cristalina bien definida, aunque en ocasiones puede contener inclusiones de otros minerales asociados.

2.3. Minerales Polimetálicos

Es aquel mineral o minerales que presentan diferentes metales en su composición y que es muy abundante y necesaria en diferentes industrias por su presencia en la naturaleza. Su abundancia es especial en nuestro país, ya que la minería peruana es considerada por ser polimetálica. **(Flores, 2018)** *"El Perú es uno de los países con contenidos de plomo, cobre, zinc, oro y plata".*

Figura 1

Mineral Polimetálico del Proyecto Minero PERUMING PANA

Nota: *La imagen referenciada muestra el mineral que extrae y explota el proyecto minero PERUMING PANA durante sus operaciones de proceso.*

2.3.1. Minerales Hidrofílicos

Son los minerales que presentan afinidad por el agua en sus superficies, esto quiere decir que se pueden humedecer o mojarse con facilidad. En el proceso de flotación los minerales hidrofílicos no se adhieren a las burbujas de aire, por lo cual estos se concentran en el relave.

2.3.2. Minerales Hidrofóbicos

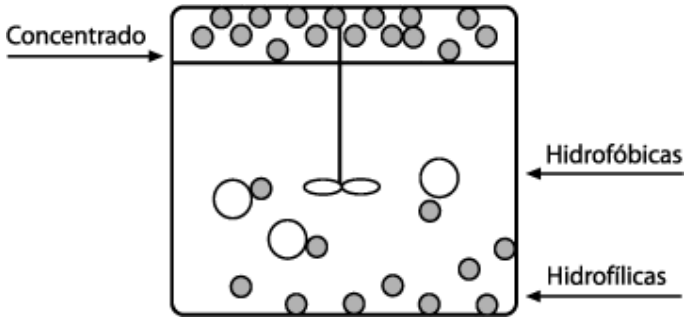
Son llamados así a los minerales con escasa afinidad por el agua, es decir, de baja mojabilidad o hidrofóbicos, incluyen a las especies nativas, sulfuros metálicos, talco, grafito, carbón bituminoso, entre otros. Estas especies presentan una resistencia natural a ser humedecidas, lo que favorece su interacción formando glóbulos de aire durante la flotación. Esta característica les permite adherirse fácilmente a las burbujas, facilitando su ascenso hacia la superficie del concentrador. Debido a esta propiedad, dichos minerales son considerados aerofílicos. Por el contrario, los minerales hidrofílicos, que presentan alta mojabilidad, son aerofóbicos, es decir, muestran escasa o nula afinidad por las burbujas de aire, dificultando así su recuperación mediante flotación.

Las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas mencionadas anteriormente representan el comportamiento superficial de las especies sólidas frente al agua, es decir, su grado de mojabilidad. Estas características influyen directamente en su respuesta dentro del desarrollo de la flotación.

En la Figura 2 se ilustra el mecanismo de interacción de ambos tipos de partículas hidrofílicas e hidrofóbicas en el interior de una celda de flotación, destacando su adhesión o repulsión frente a las burbujas de aire.

Figura 2

Representación de las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas durante el proceso de flotación



Nota: *La imagen representa como actúan los minerales hidrofóbicos e hidrofílicos dentro de una celda de flotación. Flotación por concentración en celda (Mineria, s.f.)*

2.4. Flotación

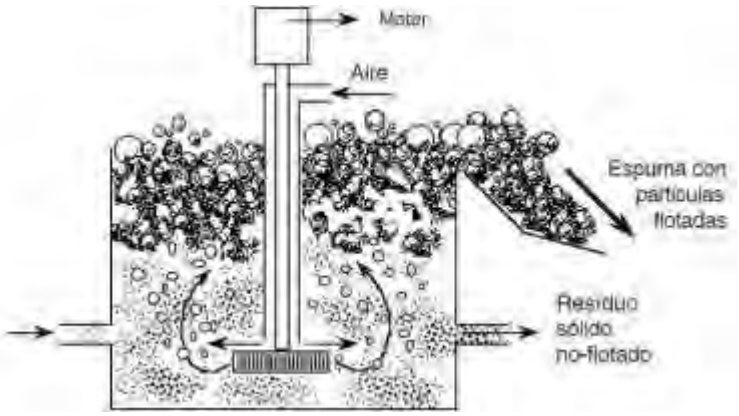
La flotación de minerales es el proceso de concentración más importante en la industria minera. Es una técnica de separación fisicoquímica que se aplica a la pulpa acuosa. Este procedimiento se basa en las propiedades superficiales de las partículas, específicamente la afinidad con el agua: los minerales hidrofóbicos (que repelen el agua) se adhieren selectivamente a las burbujas de gas y flotan hacia la superficie, mientras que los minerales hidrofílicos (que tienen afinidad con el agua) permanecen en el líquido. La flotación ajusta estas propiedades utilizando reactivos específicos, logrando así separar el mineral valioso de la ganga para obtener un concentrado de alta ley.

Al iniciar la separación por flotación, esta se desarrolla mediante diferentes modalidades, entre las cuales destacan la flotación colectiva y la selectiva o diferencial. Dentro de la flotación colectiva, se busca agrupar los componentes en dos componentes, donde el concentrado puede contener múltiples especies minerales. En contraste, la flotación diferencial o selectiva tiene como objetivo el distanciamiento de minerales

complejos, obteniendo productos que integran a una sola especie de mineral. La flotación es una técnica aplicable a una amplia variedad de materiales, tanto de origen orgánico como inorgánico, así como a minerales metálicos y no metálicos. El proceso de flotación se representa en la Figura 3.

Figura 3

Proceso de flotación en beneficio de minerales



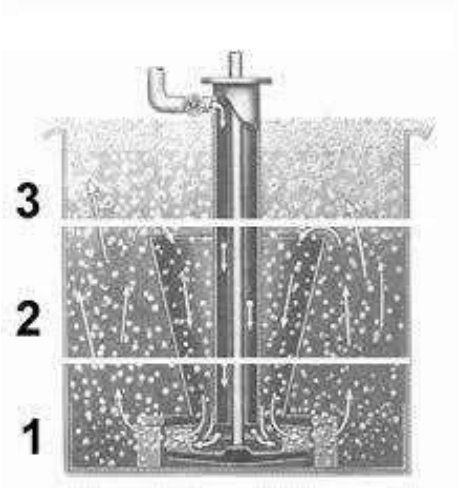
Nota: *La figura representa al mineral y su desarrollo dentro de la flotación donde se señala los componentes que existen durante el proceso (Minaja, 2018).*

2.4.1. Etapas del Proceso de Flotación

Denominada a las distintas etapas y zonas de liberación del mineral durante el proceso, estos se dan cuando el mineral de cabeza ingresa en trozos de más o menos 50 - 100 micrones a la celda de flotación hasta que quede liberado o que cada partícula individual presente un solo tipo de especie mineralógica. En la figura 4, se observa la liberación del mineral en diferentes zonas en la celda de flotación.

Figura 4

Corte transversal de una celda de flotación para indicar las diferentes zonas



(1) Zona de Agitación

(2) Zona de Mineralización

(3) Zona de Separación

Nota: *La figura ya citada, demuestra en números cada zona de liberación de mineral dentro de una celda de flotación. (Sutulov, 1963)*

Se presenta varios componentes para el trabajo de estas especies que son útiles, por ejemplo, como cobre, molibdeno, fierro, plomo, cobre o zinc; la separación de estas es algo más complicado. Pues como un método inicial para el trabajo de estas especies es optar el realizar una flotación selectiva (flotar todas las especies) con el fin de separarlas de las gangas, ya teniendo el resultado semi final del proceso, procedemos a realizar la flotación de cada componente (uno tras otro) llamado también a este proceso flotación diferencial.

2.4.2. Factores que Intervienen en la Flotación

Se tiene cuatro factores importantes durante todo el proceso de flotación:

2.4.2.1. La Pulpa

Se denomina pulpa a la mezcla de partículas minerales finamente molidas con agua, que constituye el medio en el cual se desarrolla el proceso de flotación. A esta mezcla se añade los reactivos químicos que modifica las propiedades superficiales de los minerales, permitiendo que los de carácter hidrofóbico se adhieran a las burbujas de aire y sean recuperadas como concentrado, mientras que los hidrofílicos permanecen en la fase acuosa como relave.

La pulpa conforma un fundamental elemento en la flotación de minerales, ya que permite el análisis y control de diversos parámetros operativos, tales como densidad, viscosidad y capacidad, entre otros. Sin embargo, el factor más relevante es la densidad de la pulpa de la especie mineral, dado que el agua actúa como el medio fluido principal en el sistema.

En la Tabla 1 se puede dar a conocer los principales componentes de una pulpa que se forma por un líquido y sólido.

Tabla 1

Componentes de una pulpa

Elemento	Volumen (I)	Peso (Kg)	Densidad (Kg/l) ó (t/m3)	Caso V(pulpa) = 1; líquido: agua
Pulpa	V	P	d	d = P
Líquido	V_l	P_l	d_l	$d_l = 1$; $V_1 = P1$
Sólido	V_s	P_s	d_s	$D_s = P_s/V_s$

Nota: *Universidad de Cantabria, Capítulo 3: Pulpas.*

2.4.2.1.1. Relaciones de los componentes de la pulpa en flotación

- ***Densidad:*** Se define como la relación entre el volumen y la masa de una sustancia o de un objeto sólido. Quiere decir que da a conocer cuánto de peso hay en un determinado volumen de mineral. La densidad se calcula mediante la Ecuación 1.

$$P = V * d \qquad \text{[Ecuación 1]}$$

Para definir la conservación de masas durante el proceso se utiliza la Ecuación 2.

$$P = P_l + P_s \qquad \text{[Ecuación 2]}$$

- ***Humedad:*** Se define como la correlación entre el componente líquido y el peso total de la pulpa de la especie del mineral, se calcula utilizando la Ecuación 3.

$$H = P_l / P \qquad \text{[Ecuación 3]}$$

- ***Dilución:*** Definida como la relación que existe entre el componente sólido y el componente líquido. Esta formulada por la ecuación 4.

$$D = P_l / P_s \qquad \text{[Ecuación 4]}$$

- ***pH:*** Marcador del nivel de basicidad o acidez de una mezcla, en este caso pulpa. Este factor se mide de 0 a 14, utilizando un pH metro o potenciómetro; donde se indica que de 0 a 6 es ácido, 7 es un pH neutro (quiere decir que no es ni alcalino ni ácido) y de 8 a 14 es alcalino.

2.4.2.2. Los Reactivos

Son aquellos componentes químicos de alta selectividad que se utilizan para la recuperación de elementos sulfurados valiosos, es la variable de mayor importancia, pues deprime y desprecia al mineral no valioso (ganga). Al hacer el uso de estos reactivos, se puede obtener elementos con mayor realce en los diferentes concentrados.

Los reactivos ayudan a asociar a uno o más elementos valiosos dentro de la celda de flotación cambiando los componentes químicos o físicos, para crear condiciones en el proceso de flotación de partículas del mineral.

Se clasifican en tres clases:

1) *Los Espumantes*
2) *Los Colectores*
3) *Los Modificadores*

2.4.2.3. El Aire

Factor importante en la flotación donde su principal objetivo es crear o formar burbujas, estas burbujas a su vez acompañarán a las partículas sulfuradas dentro de la celda. La función principal de las burbujas, es el de hacer flotar o subir a las especies valiosas hacia la zona de la pulpa en cada circuito.

- El aire en la flotación se consigue mediante los Blowers que son ventiladores, donde el aire ingresa a presión baja de 1200 RPM dentro de las celdas llenas de pulpa.
- Si hay un exceso de aire, es porque hay en exceso agitación, donde se provoca la ruptura de espumas, esto antes de desbordar por los labios de la celda, o que se rebalse junto con la pulpa.
- Por el contrario, una insuficiente inyección de aire en la celda genera la formación de espumas inestables o deficientes en las columnas, lo que dificulta la recuperación eficiente de los minerales de valor. Como consecuencia, estos

elementos terminan siendo arrastrados hacia el relave general, reduciendo la eficacia del tratamiento.

- Se regula la dosis de aire durante el proceso teniendo en cuenta las necesidades requeridas. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que no se debe usar un aire elevado, ni poco aire en el proceso, se maneja un correcto control de la altura y del aire que las compuertas darán como resultado una espuma optima e incluso un espumante regulado es suficiente.

2.4.2.4. La Agitación

Con la utilización de este factor se permite modelar los glóbulos de aire, para realizar el proceso, además mediante este, conseguimos una mezcla pareja de los elementos de la pulpa con los reactivos dentro de una celda. Otra función principal de este factor, es que mediante este proceso no se consigue la sedimentación de los sólidos en la pulpa.

- El proceso de agitación en la flotación con celdas debe ser atenuada, ya que, si es superior, la pulpa puede rebalsar en lugar de las espumas, así también puede llegar a que durante el proceso se observen rupturas de las burbujas.

- Si la agitación es escasa, la pulpa no llega a rebalsar y las espumas se hacen pequeñas. También esto se da cuando los impulsores de la celda (parte de una celda de flotación) están deteriorados o cuando dentro de la celda hay poco aire o también porque el estabilizador esté malogrado.

2.5. Reactivos de flotación

Los reactivos desempeñan una función fundamental dentro de la flotación, ya que, al ser incorporados al sistema realizan funciones diversas que posibilitan el

distanciamiento de la parte valiosa contenida en la pulpa respecto a la ganga. Los reactivos se clasifican en diferentes categorías según su función específica dentro del circuito de flotación:

- *Colector o colectores*
- *Espumantes*
- *Reguladores o acondicionadores*

2.5.1. Colectores

(Ballester, Verdeja, & Sancho) *un colector es un compuesto orgánico con una molécula constituida por una parte no polar (normalmente hidrocarbonada) y un grupo polar.*

El grupo polar tiende a adsorber el mineral sobre la zona iónica y el grupo no polar tiende a dirigirse al exterior haciendo que el sólido tenga un comportamiento hidrofóbico. Además de estas sustancias, existen también compuestos químicos no polares utilizables como colectores.

Los reactivos colectores proporcionan características hidrofóbicas a los minerales, especialmente se agrupan a los sulfuros y al aire, pero no tanto a la ganga. Su objetivo principal es la hidrofobización selectiva de las superficies de las especies, ideando favorables condiciones para la unión de los glóbulos de aire, incrementando el ángulo de contacto con estas burbujas.

Los tipos de colectores en función de la composición química, son los siguientes:

- **Aceites y derivados del petróleo:** En este grupo se encuentran los líquidos hidrocarbonados que no presentan polos y no se disocian en agua como los

alcoholes sulfatados, sulfonatos de petróleo, etc. Estos reactivos se usan mayormente en la flotación de azufre, carbón, molibdenita, rutilo, óxidos de hierro, barita, casiterita, fluorita, etc.

- **Ácidos orgánicos:** "Son bases orgánicas y sales de ácidos orgánicos en los que las moléculas están formadas por grupos no polares (radicales de cadena larga) y un grupo polar del tipo -COOOH, -OH, -SH, -NH_2, algunos de estos colectores se ionizan en agua, logrando la formación de aniones, por ejemplo, el ácido esteárico de formula CH_3-$(CH_2)_{16}$ -COOH que es un ácido saturado, o el ácido oleico, insaturado de formula C_8H_{17}-CHOH-CH_2-COOH.". (Ballester, Verdeja, & Sancho, pág. 91)

  En la Tabla 2, se exponen los colectores más utilizados en la industria y sus aplicaciones.

Tabla 2

Colectores más utilizados y sus aplicaciones

Colector	Fórmula	Aplicaciones
Aniones sulhídricos		
Xantatos	R-O-C-(S)(S-M^+)	Sulfuros metálicos (En general).
Ditiofosfatos	$(R-O)_2$-P-(S)(S-M^+)	Sulfuros Cu – Zn.
Aniónicos oxihídrilos		
Ácidos grasos	R-COOH	Minerales oxidados de Cu.
Jabones	R-COO-	Barita, óxidos de Fe.
Alquilisulfatos	R-S-SO_3-	Barita, scheelita.
Sulfonatos	R-SO_3	Barita, fluorita, mica.
Catiónicos		
Aminas	R-NH_2(R`)	Óxidos, carbonatos.
Sales de amonio	(R, R`, R``, R```)-N	Silicatos, haluros.
No iónicos		
Dialquilditiocarbamatos	R-S-C-(S)(NHR`)	Sulfuros de Cu, Cu-Mo, Cu-Ni.
Dialquildicarbamatos	R-O-C-(S)(NHR`)	Sulfuros de Ni.
Aceites y derivados del petróleo		Grafito, S, MoS_2, barita, rutilo, fluorita.

Nota: *(Ballester, Verdeja, & Sancho) Aplicaciones de los colectores más utilizados en la industria metalúrgica.*

2.5.2. Espumantes

Los espumantes constituyen reactivos de naturaleza activa que presentan tensión superficial y carácter heteropolar, lo que les permite adsorberse en la interfase agua - aire. Su principal función radica en otorgar estabilidad a los glóbulos de aire generadas en la pulpa, evitando su coalescencia y reduciendo la probabilidad de que colapsen al alcanzar la superficie. De manera complementaria, los espumantes confieren elasticidad a las burbujas, favoreciendo su ascenso y facilitando su paso a través de la capa superior de agua, logrando así emerger íntegras en la interfase aire-agua.

(Ballester, Verdeja, & Sancho, pág. 93) los espumantes más utilizados son: el aceite de pino, formado por α-terpineol (60-70%), alcoholes terciariarios (10%) y alcanfor (10-15%), ácidos criselicos, formados por mezclas de isómeros del cresol, xilenol y fenol; alcoholes alifáticos, siendo el más utilizado, entre otros, el 4-metil 2-pentanol. Los agentes citados presentan una ligera solubilidad en agua. Otros agentes espumantes menos utilizados, y muy solubles en agua son los éteres poliglicoles. En ocasiones se utilizan mezclas de algunos de los anteriores espumantes."

2.5.2.1. Clasificación de los espumantes.

Los espumantes presentan una eficacia en su acción y permiten tener en la pulpa diferentes valores de pH. Los espumantes se clasifican en:

- **Básicos:** Estos presentan una propiedad alta para generar espumas en medios muy alcalinos. A este grupo pertenecen las bases de piridina pesadas.
- **Ácidos:** La capacidad espumante de estos reactivos se reduce progresivamente con el incremento de la alcalinidad en la pulpa. Dentro de este grupo de espumantes de carácter ácido se incluyen los alquilarilsulfonatos, como los detergentes y azolatos, así como los compuestos fenólicos, entre los que destacan el xilenol, cresol y los aceites de madera que en su composición poseen fenol y derivados relacionados.
- **Neutros:** Son aquellos espumantes más importante debido a su cantidad e importancia. Su empleo durante este proceso (flotación), no necesitará del pH de la pulpa de la especie.

Este grupo de reactivos se clasifica en tres grupos:

- Conformado por compuestos que contienen estructuras alicíclicas y alcoholes aromáticos, dentro de los cuales se incluyen diversos tipos de aceites, así tenemos el aceite de madera, pino y el de terpinoleno.
- Los reactivos que contiene alcoholes alifáticos, que se obtienen mediante la mezcla de alcoholes.
- Los reactivos que contienen sustancias con enlaces éteres.

2.5.3. Reguladores o acondicionadores.

Son reactivos químicos que se utilizan en las operaciones de flotación para mejorar la separación de los diferentes componentes del mineral. Es decir, son reactivos adicionales a colector y espumante. En unos casos permiten una mejor operación de flotación, incrementándose el ángulo de contacto, y en otros casos, hacen que la operación sea más selectiva disminuyendo este parámetro en la especie que no se desea flotar.

A continuación, se incluye la clasificación de estos reactivos según la función que tienen:

- **Depresores:** Reactivos químicos que son utilizados para impedir la flotación de ciertas especies minerales que en ausencia de los depresores flotarían.

  Generalmente el efecto que causan estos reactivos es el de formar compuestos insolubles sobre la superficie del mineral hidrolizando la superficie del mismo y, por consiguiente, evitar el contacto directo colector- superficie del sólido.

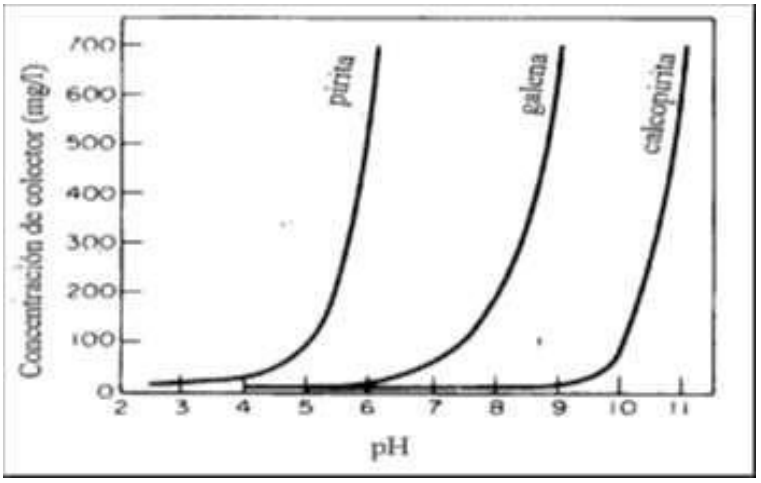
- **Activadores:** Los activadores son reactivos químicos que contribuyen a flotar mejor a numerosas especies minerales. En la ausencia de activadores se obtienen bajos rendimientos en las uniones mineral-colector. Estos reactivos anulan el efecto de los reactivos depresores que se hayan usado antes.

- **Reguladores de pH:** (Ballester, Verdeja, & Sancho, pág. 93) "*Son reactivos ácidos o básicos que regulan el pH del procedimiento de flotación para fijar un rango oscilado de trabajo en el que la adsorción de colector es más favorable. Los iones* OH^- *y* H_3O^+ *modifican la capa eléctrica doble que se posee en la zona del mineral y, en consecuencia, el potencial zeta, afectando a la flotación. En estudios realizados por numerosos autores se han determinado los valores críticos de pH por debajo de los cuales el mineral flota."*

  El efecto para algunos minerales se observa en la Figura 5.

Figura 5

Influencia del pH en la flotación de distintos minerales



Nota**:** *Los valores críticos de pH no solo dependen de la composición del mineral, esto también depende del tipo de colector utilizado de su concentración y de la temperatura (Ballester, Verdeja, & Sancho).*

2.5.4. Tipos de Reactivos a utilizar en el proceso de flotación bulk

A continuación, se describen los principales reactivos que se utilizarán en el desarrollo del trabajo de investigación.

2.5.4.1. Xantato Isopropílico de Sodio (Z11)

El xantato Isopropílico de sodio (Z11) es de los colectores usados ampliamente para el proceso de flotación de minerales sulfurados, su obtención se genera por la reacción del bisulfuro de carbono e hidróxido de sodio.

Se considera a este reactivo como un reactivo muy selectivo y que al ser usado da como resultado un producto con buena recuperación. Su utilización es esencial para procesos de flotación de zinc ya que se demostró que al ser utilizado en la flotación se genera buenas recuperaciones de este elemento.

Usado también en la flotación de Cobre – zinc, Plomo – zinc, cobre – plomo – zinc, minerales que contienen pirita y pirrotita, minerales con ley baja y refractarios que presentan baja ley de oro.

- **Formula Química:** $(CH_3)_2CHOCSSNa$
- **Gravedad Especifica:** 1.3501
- **Solubilidad:** 37.1 g/100g de solución
- **Densidad Aparente:** 0.718 g/ml
- **Pureza:** 85% mínimo

2.5.4.2. Sulfato de zinc (ZnSO4)

Reactivo químico que será usado como depresor en el proceso de flotación. Su función es deprimir las impurezas presentes en los procesos metalúrgicos, ayuda en la flotación para la obtención de cobre y plomo.

- **Formula Química:** $ZnSO_4$
- **Densidad Aparente:** 1.97 g/cm

2.5.4.3. Cianuro de Sodio (NaCN)

(S.A, 2010) *da a conocer que el Cianuro de sodio es un reactivo químico utilizado para la extracción de minerales metálicos, al ser utilizado en el proceso de flotación disuelve el oro de los minerales, formándose dicianoaurato de sodio en baños galvánicos.*

- **Formula Química:** NaCN
- **Peso Molecular:** 49.01 g/mol
- **Solubilidad:** soluble en agua
- **Gravedad Especifica:** 1.61 g/ml

2.5.4.4. Aeroflat A-242

Colector muy utilizado para la flotación de plomo (Pb), zinc (Zn) y cobre (Cu), donde estas se presentan como esfaleritas sulfuros de fierro y donde se encuentra la pirita y pirrotita, donde estos no presentan una buena selectividad.

Este reactivo ayuda a mejorar la recuperación de la plata notablemente en los procesos de flotación polimetálicos, así como presenta una buena recuperación, también presenta una buena cinética, lo que permite que durante el proceso de flotación esta sea dosificada y acondicionada por etapas. Cabe recalcar que al usar este reactivo se desarrollará espumas ligeras durante el proceso.

Su dosificación varía entre 10 – 75 g/l dependiendo con qué tipo de mineral se trabajará, siendo un reactivo corrosivo puede ocasionarnos quemaduras graves ya sea en ojos o en piel.

- **Gravedad Especifica:** 1.13
- **Solubilidad:** soluble
- **pH:** 9 - 11

2.5.4.5. MIBC

El Metil Isobutil Carbinol conocido como MIBC, es un alcohol con poca solubilidad, pero que es miscible o que puede ser mezclado con otros disolventes orgánicos. Para el proceso de flotación de minerales sulfurados es considerado como espumante, es utilizado en varios circuitos de flotación para la flotación de minerales de cobre, molibdeno o metales que contienen oro, así como los minerales polimetálicos de zinc, plata, plomo o minerales no metálicos como el carbón, entre otros.

Al ser considerado un espumante para el proceso de flotación, este al ser utilizado genera una espuma seca, fina y de buen sustento en las celdas de flotación, pero que se descompone con rapidez. Este producto es selectivo para la recuperación de partículas finas y contribuye a aumentar el rendimiento en el proceso de flotación.

Es un reactivo muy utilizado puesto que se compatibiliza bien con los colectores usados en los circuitos de flotación y este puede ser usado en un rango de pH amplio.

- **Gravedad Especifica:** 0,81 a 0,82
- **Peso Molecular:** 102 g/mol
- **pH/ 20 °C:** N/A

2.5.4.6. Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)

El carbonato de sodio es usado como regulador de pH en el proceso de flotación de minerales, al ser usado creará un entorno alcalino que es óptimo en la separación de minerales valiosos. Ayuda a establecer la pulpa del mineral y ayuda en la mejora de la flotabilidad haciendo que los reactivos sean más eficientes y así se puedan eliminar las impurezas.

Aparte de ser un regulador se usa como amortiguador de pH, puesto que ayuda a mantener el rango de pH deseado.

- **Gravedad Especifica:** 2.53 g/cm^3
- **Peso Molecular:** 105.99 gr/mol
- **pH/ (Sin al 10%):** 11.4

2.6. Tipos de Flotación

En la flotación existen distintos procesos para la obtención de concentrados, donde se encuentran las siguientes:

- Flotación por espumas
- Flotación por películas
- Flotación por aceites

Hasta la fecha, el proceso de flotación por espumas constituye uno de los métodos ampliamente empleado en los procesos metalúrgicos destinados a la concentración de minerales.

2.6.1. Tipos de Flotación por Espumas

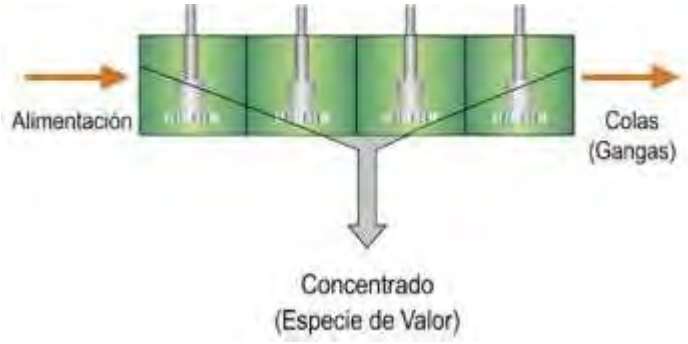
2.6.1.1. Flotación Directa o Estándar.

Se dispone de una amplia variedad de configuraciones de circuitos de flotación, adaptadas al mineral y su caracterización, al proceso metalúrgico y sus objetivos. El circuito de flotación más utilizado es el circuito de flotación estándar, donde se tiene como objetivo separar una sola especie valiosa de la ganga.

En la Figura 6, se visualiza el circuito de flotación estándar.

Figura 6

Esquema de flotación diferencial o estándar



***Nota**:* (Zanabria, 2020) *En el presente diagrama se logra flotar la especie de valor, recogiéndola en su forma de concentrado, y desechando lo demás como cola.*

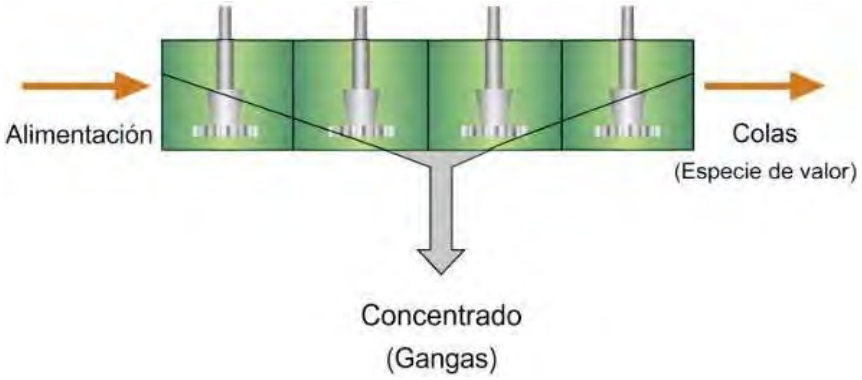
2.6.1.2. Flotación Inversa.

En la mayoría de los circuitos y operaciones de flotación, el concentrado obtenido contiene principalmente la especie mineral de interés económico. Sin embargo, en ciertos casos específicos, el objetivo del proceso es separar la ganga mediante su flotación. Esta modalidad se conoce como flotación inversa y se aplica cuando es necesario remover una proporción menor de material no valioso presente considerablemente en un volumen de mineral valioso. Como ejemplo representativo, se tiene a la flotación selectiva de la pirita incluida en minerales de plomo o zinc.

El circuito de flotación inversa se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Esquema de flotación inversa



Nota: *Proceso usado comúnmente cuando se requiere flotar pequeñas cantidades de minerales, esta presenta varias celdas de flotación obteniendo de estas un concentrado. (Zanabria, 2020)*

2.6.2. Flotación bulk o colectiva

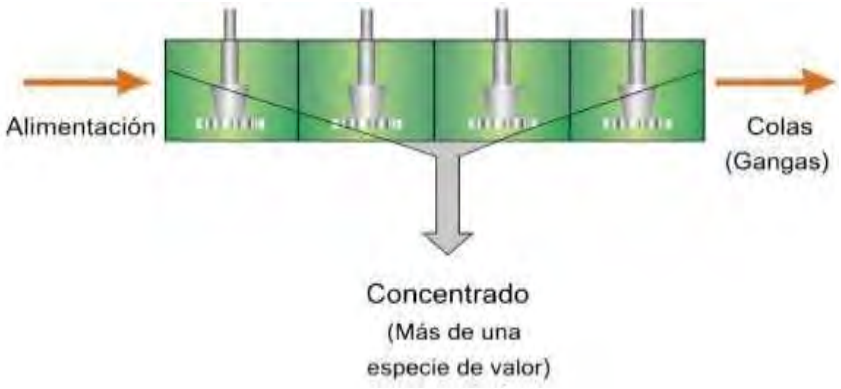
La flotación colectiva, comprende la flotación de los minerales más estimados de interés en un solo concentrado.

Un caso representativo es la flotación colectiva aplicada a minerales de molibdeno y cobre, donde inicialmente se obtiene el cobre-molibdeno como concentrado mixto. La separación de ambos minerales se realiza posteriormente mediante una etapa denominada flotación diferencial.

En la Figura 8 se observa el correspondiente circuito al hacer uso de este tipo de flotación colectiva.

Figura 8

Esquema de la flotación Bulk o colectiva



Nota: *En este tipo de flotación se obtiene como concentrado más de una especie de valor. (Zanabria, 2020).*

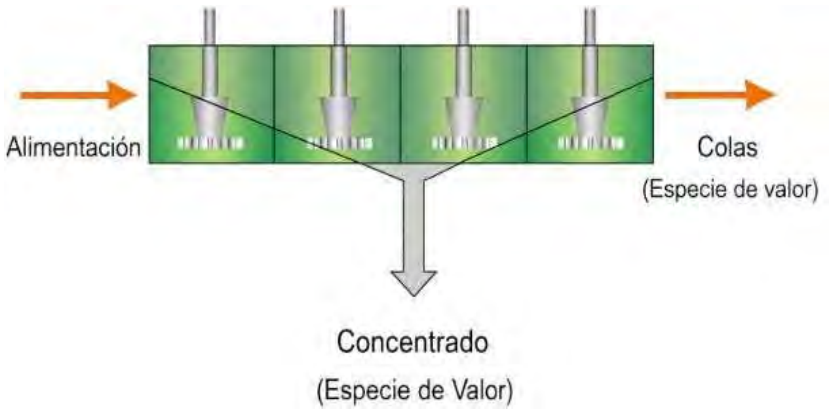
2.6.3. Flotación diferencial o selectiva

La flotación diferencial da a conocer el proceso por el cual se logra la separación de diferentes tipos de minerales.

Dentro de este proceso, el concentrado obtenido se divide en dos productos minerales distintos. Para llevar a cabo esta separación, es necesario modificar las condiciones químicas del sistema, de modo que dichas variaciones influyan diferencialmente sobre las propiedades de los minerales presentes, favoreciendo la recuperación selectiva de uno de ellos frente al otro. En la figura 9, se observa el circuito de flotación diferencial.

Figura 9

Esquema de la flotación diferencial o selectiva



***Nota**: Para este tipo de flotación se requiere de una especie que alimente a estas celdas, donde se obtiene un concentrado con un valor.* (Zanabria, 2020).

2.6.4. Fases en la flotación

2.6.4.1. Fase solida

Etapa que se caracteriza por la existencia de partículas con distribución granulométrica fina, producto de una molienda adecuada.

La composición química y la estructura cristalina del mineral dependen de las propiedades superficiales. En lo que respecta a los sólidos, los factores más destacados que influyen en la flotación, son los siguientes:

- Defectos presentes en la red cristalina.
- Impurezas originadas por la interacción con sólidos, líquidos o gases, tales como la oxidación superficial, entre otros.

2.6.4.2. Fase liquida

En el proceso de flotación, la fase líquida está constituida principalmente por el agua. Es fundamental considerar la presencia de impurezas y contaminantes inherentes

tanto al agua natural como a la de origen industrial. Un factor relevante es la dureza del agua, atribuida a la presencia de sales disueltas de calcio, magnesio y sodio. Estos compuestos, junto con otros contaminantes, pueden modificar las propiedades de flotabilidad de ciertos minerales, además de incrementar significativamente el consumo de reactivos durante el proceso.

2.6.4.3. Fase gaseosa

Esta fase corresponde al aire, el cual es integrado en las celdas de flotación ya sea de forma mecánica o mediante inyección neumática, con el propósito de generar burbujas. El aire desempeña funciones fundamentales dentro del proceso de flotación, entre las que destacan:

- Su influencia directa en las reacciones químicas que se desarrollan durante la flotación.
- A través de las burbujas de aire se realiza el transporte de las partículas que se dirigirán a la superficie de la celda.

2.7. Interfases de la flotación

El proceso de flotación involucra tres principales fases: líquida, sólida y gaseosa. No obstante, en cada fase que se trabaja existen propiedades individuales que no se determinan por sí solas en la eficiencia del proceso. Lo verdaderamente relevante son las propiedades que emergen en las zonas de contacto entre estas fases, conocidas como regiones interfaciales o interfases.

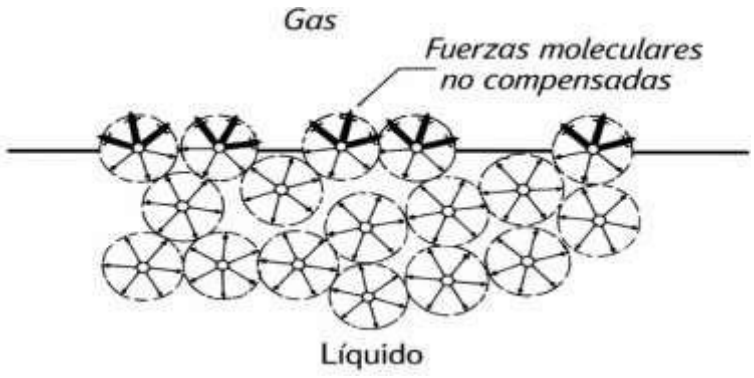
Las interfases que presentan más importancia en la flotación, es la fase gas-líquido y la sólido-líquido, ya que en ellas se desarrollan los fenómenos fisicoquímicos que condicionan la adhesión de las burbujas a las partículas.

2.7.1. Interfase gas – liquido G-L

La absorción de los compuestos en la interfase gas-líquido corresponden a sustancias tensoactivas, cuya principal función es disminuir del sistema la tensión superficial. En el contexto de la flotación, estos tensoactivos se conocen como espumantes, ya que promueven la formación y estabilización de la fase espumosa, facilitando la recolección y el transporte hacia la superficie de las partículas del mineral.

Figura 10

Interpretación esquemática del origen de la tensión superficial



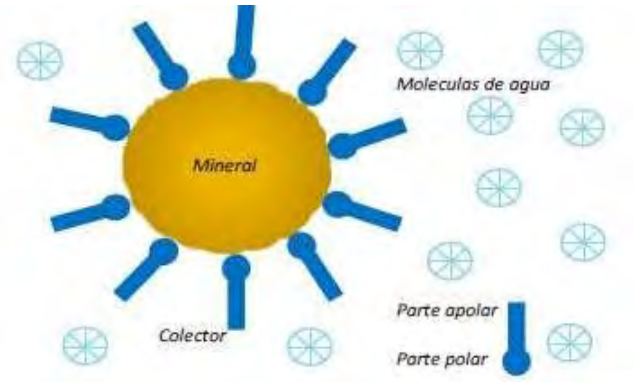
Nota: *(Sutulov, 1963), mediante la imagen (Figura 10), se puede dar a conocer el origen de las fuerzas moleculares y cómo influyen dentro de la fase G-L del proceso de flotación.*

2.7.2. Interfase solido- líquido S-L

Aquellos reactivos denominados colectores, son compuestos que se adsorben sobre la superficie del mineral, promoviendo su hidrofobización de manera artificial y selectiva. Este mecanismo permite que los minerales de interés adquieran afinidad por la fase gaseosa, facilitando su adhesión a las burbujas durante el proceso de flotación.

Figura 11

Interpretación de la interfase sólida -líquida



Nota: *(Huallpa Antoniete, 2018), mineral hidrofobizado con colector. Imagen mejorada por el autor (Sutulov, 1963).*

2.8. Termodinámica de las interfases

En el transcurso de los fenómenos interfaciales, se produce una fuerza característica en el plano que separa las fases, conocida como **tensión superficial** o **tensión interfacial**, según corresponda.

Esta fuerza puede interpretarse como la energía libre de la superficie por unidad de área, y representa la resistencia del sistema a aumentar el área de contacto entre fases.

2.8.1. Tensión superficial

Este término es definido termodinámicamente como la medición del trabajo que se requiere para adicionar en una unidad de área a la superficie, a la temperatura, presión y masa constantes. Entonces la expresión de la tensión superficial se expresa mediante la Ecuación 5.

$$\gamma = \left[\frac{dG}{dA}\right] T, P, n \qquad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

- G^s = Energía libre superficial (ergs/cm^2)
- n = número de moles necesarios en el sistema (mol)
- T = temperatura absoluta (°K)
- γ = Tensión superficial (dinas/cm)
- A = área interfacial (cm^2)
- P = presión absoluta (Pa)
- P, T, n = presión, temperatura absoluta y numero de moles presentes en el sistema.

2.8.2. Superficies de Sólidos

Cuando se habla de energía libre superficial, se crea la referencia a la posibilidad de que, en los sólidos cristalinos, ocurran fenómenos de deformación estructural y polarización iónica en la superficie. Esto se debe a la asimetría existente en la disposición anión-catión en dicha región. Tales características superficiales favorecen la manifestación de fenómenos interfaciales relevantes como la adsorción, la nucleación y la mojabilidad.

2.8.3. Adsorción

La adsorción se refiere al fenómeno mediante el cual una especie química, como iones o moléculas, se acumula o concentra en una interfase. Esta cantidad adsorbida suele expresarse en función de moles o número de moléculas por unidad de área interfacial. El comportamiento de la adsorción en una interfase puede ser descrito teóricamente

mediante la ecuación de Gibbs (Ecuación 6), la cual relaciona en su variación y la energía superficial, con los cambios en la concentración de los componentes presentes:

$$r_i = -\frac{1}{RT}\ \frac{dy}{dLnC_i} \qquad \text{[Ecuación 6]}$$

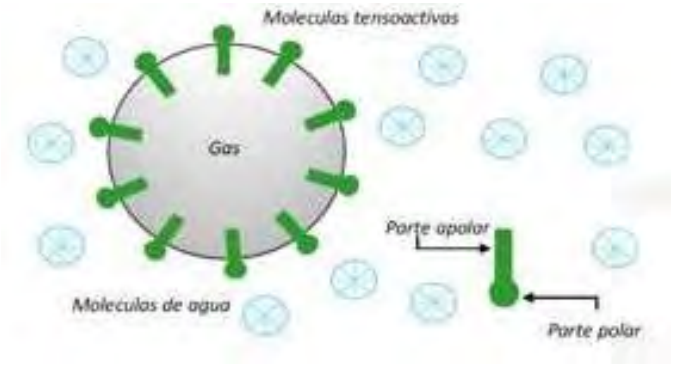
Donde:

- C_i = Concentración del componente i.
- R = Constante de los gases.
- T = Temperatura absoluta
- r_i = Adsorción relativa del componente i (densidad de adsorción).
- y = fuerza de tensión superficial

En el contexto de la flotación, la adsorción se desarrolla principalmente en las interfases de mayor relevancia: gas-líquido (aire-agua) y sólido-líquido (mineral-agua). Sin embargo, en la interfase gas-sólido se presenta, como resultado el proceso de oxidación superficial de los minerales, los cuales modifican sus propiedades de superficie y, por ende, su comportamiento durante la flotación.

Figura 12

Interpretación del fenómeno de Adsorción



Nota: *(Huallpa Antoniete, 2018), fenómeno de adsorción de materiales tensoactivos, modificado y mejorado por el autor (Sutulov, 1963).*

La adsorción se clasifica según la naturaleza de la interacción entre el adsorbato y el adsorbente, distinguiéndose dos tipos principales: la adsorción física (fisisorción), caracterizada por interacciones débiles de tipo Van Der Waals, y la adsorción química (Quimi sorción), en la que se establecen enlaces químicos entre las especies adsorbidas y la superficie del sólido

- **Adsorción física:** se produce como consecuencia de fuerzas residuales o de interacciones químicas de manera secundaria, principalmente de tipo Van Der Waals.

- **Adsorción química:** tiene lugar a partir de las interacciones químicas primarias entre el adsorbato y el adsorbente, lo que conlleva la formación de enlaces de naturaleza covalente o iónica.

2.8.4. Potencial Electroquímico

Utilizado para dar equilibrio a la interfase sólido – líquido, ya que la hidratación de partículas sólidas (minerales) se realiza de forma dispareja. Durante el proceso, es

necesario limitar la emulsión de cationes que provienen del mineral y de su red cristalina. Simultáneamente, cuando se da la solución circundante, se produce la atracción de iones positivos hacia la superficie sólida. Este fenómeno da lugar a la formación de una capa de potencial eléctrico en la interfase sólido-líquido, cuyo origen se encuentra en la estructuración de una doble capa eléctrica generada por la separación de cargas en dicha región.

El potencial electroquímico generado en la doble capa eléctrica está directamente influenciado por la concentración iónica en la solución se formula mediante la siguiente Ecuación 7:

$$2 = \frac{RT}{F} \ln \frac{(C)B}{(C)A} \qquad \text{[Ecuación 7]}$$

Donde:

- ***(C) A*** *y* ***(C) B*** definidas como concentraciones de iones en la superficie del sólido y líquido.
- ***R, T, F*** son constantes conocidas.

2.8.5. Potencial Electrocinético

El potencial Electrocinético, también conocido como potencial zeta (ξ), se origina cuando el sólido comienza a desplazarse dentro del medio líquido, arrastrando consigo parte de los iones que componen la doble capa eléctrica asociada a su superficie. Estos iones, firmemente adsorbidos, permanecen ligados al sólido, mientras que los iones de la región de difusión, al no estar fijamente asociados, se mantienen inmóviles respecto al sólido y se mueven en dirección contraria. Esta diferencia de movimiento entre las capas genera un gradiente eléctrico entre dos regiones con carga, lo que da lugar al desarrollo del potencial zeta.

El potencial Electrocinético, dependerá de la velocidad relativa entre el movimiento del sólido y el líquido circundante, así como de la caracterización de la doble capa eléctrica y de la zona de difusión, y se expresa mediante la Ecuación 8.

$$\xi = \frac{4\,\varphi\,V}{DE} \qquad \text{[Ecuación 8]}$$

Donde:

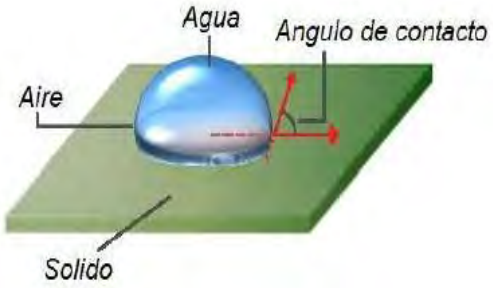
- D = constante dieléctrica del líquido
- φ = viscosidad
- V = velocidad de movimiento del sólido
- E = intensidad del campo eléctrico

2.9. Contacto de Tres Fases

El contacto trifásico constituye el fenómeno más relevante dentro del proceso de flotación, ya que representa de manera precisa la interacción esencial que ocurre durante la separación mineralógica como se aprecia en la Figura 13. En este mecanismo, la adhesión de la partícula sólida a un glóbulo de aire —que actúa como modo de transporte— se produce a través de una región donde simultáneamente se relacionan las tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Esta zona de contacto trifásico posee propiedades interfaciales particulares que en el proceso de flotación determinarán su eficiencia.

Figura 13

Representación gráfica del contacto de tres fases



Nota: *Definición de ángulo de contacto en el proceso de flotación (Huallpa Antoniete, 2018), modificado del libro "Flotación de Minerales" (Sutulov, 1963).*

Para que se produzca la adhesión entre una burbuja y una partícula mineral, deben cumplirse ciertas condiciones termodinámicas, como la disminución de la energía libre del sistema y un ángulo de contacto favorable que refleje una superficie hidrofóbica:

La adherencia es la colisión entre la burbuja y la partícula. Para que esta sea efectiva, debe producirse rápidamente la ruptura del film líquido y el adelgazamiento que hace que ambos se separen, permitiendo la generación de una nueva interfase sólido/gas. La eficiencia y estabilidad de esta unión dependen directamente del grado de hidrofobicidad del mineral.

Durante la generación de esta nueva fase, interviene un efecto cinético clave: el tiempo de inducción, definido como el intervalo mínimo necesario para que se establezca una adherencia estable entre la partícula y la burbuja.

En flotación, este tiempo debe ser menor que la duración de la colisión para que la adhesión ocurra. En ese breve lapso, debe reemplazarse la interfase sólida/líquido por la sólido/gas, lo cual implica superar fuerzas de oposición asociadas a la energía superficial del agua en la película intermedia. Este fenómeno depende de la superficie del

mineral y de la afinidad del agua, es decir, de su hidrofobicidad, propiedad controlada principalmente por la tensión superficial.

Desde la parte termodinámica, este fenómeno se describe mediante la expresión correspondiente al transformar la energía libre superficial que está relacionado con la adhesión burbuja – partícula, en medio acuoso Ecuación 9.

$$\Delta_{adh} = \gamma SG - \gamma SL - \gamma LG \qquad \text{[Ecuación 9]}$$

Δ_{adh} = Variacion de energía libre superficial durante la adhesión partícula, mineral burbuja

γSG, γSL, γLG = Tensiones superficiales para las interfases solido/gas, solido/líquido y liquido/gas.

El proceso de flotación se desarrolla cuando las tensiones superficiales presentan un balance donde resulta favorable el sistema trifásico mineral/gas/líquido (generalmente agua). Desde la perspectiva termodinámica, dicho fenómeno se interpreta a través de la modificación de la energía libre superficial asociada a la adhesión de la partícula mineral con la burbuja en un medio acuoso.

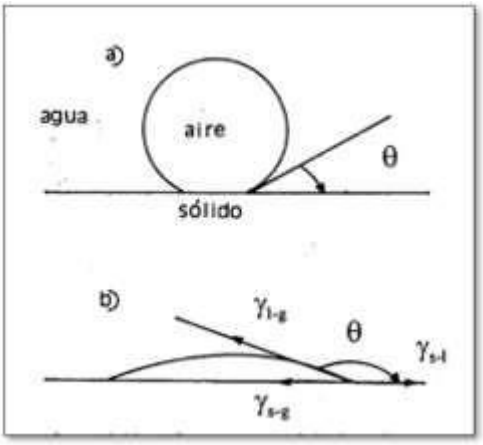
Dado que la medición experimental de las tensiones interfaciales sólido/gas y sólido/líquido presenta dificultades, se utiliza la ecuación de Young como un método indirecto. Esta relación matemática permite vincular el ángulo de contacto —parámetro experimental que refleja el grado de hidrofobicidad del sólido— con las tensiones superficiales que intervienen en la red trifásica.

2.10. Ángulo de contacto

Constante que determina la mojabilidad de la superficie de un mineral, se presenta de manera físico - química. Se forma a partir de la partícula sólida por su superficie plana y su tangente que está constituida por la burbuja de aire en la zona de contacto. En la siguiente figura se puede observar el esquema del ángulo de contacto.

Figura 14

Esquema del ángulo de contacto



Nota: *Su utilidad estriba en que la medida del ángulo informa acerca de la avidez por el aire o hidrofobicidad de la superficie del sólido." (Ballester, Verdeja, & Sancho, pág. 96).*

Una burbuja de aire presenta forma esférica antes de su contacto con las partículas de mineral. Cuando este contacto se origina, la burbuja se deforma. En estas condiciones, θ es el ángulo de contacto, y γs-g, γs-l ,γl-g son las tensiones interfaciales solido-gas, solido-líquido y liquido gas. Existe una ecuación que refleja el equilibrio de fuerzas, la ecuación está representada por la Ecuación 10.

$$\boldsymbol{\gamma_{s-g} - \gamma_{s-l} = \gamma_{l-g}\, cos\theta} \qquad \text{[Ecuación 10]}$$

Donde:

- $\gamma_{l\text{-}g}$ = **es** una constante igual a 0,072 $N.m^{-1}$ para el agua

(Ballester, Verdeja, & Sancho, pág. 90) *"En estas condiciones, cuando γs-g > γs-l el ángulo de contacto será inferior a 90º, con lo que el agua recubre preferentemente al sólido y el contacto mineral-aire no es posible. Cuando γs-g < γs-l el ángulo de contacto será superior a 90º y la burbuja de aire tanto más el sólido cuanto mayor se haga el ángulo θ. Si el sólido es suficientemente pequeño, el complejo partícula-burbuja flotará y tendrá tendencia a asociarse a la espuma."*

2.11. Cinética de la flotación

(Astucuri, 1994, pág. 90) *"La cinética de la flotación de minerales puede caracterizarse por la variación en el tiempo de la cantidad de producto transportado por las espumas. Es posible relacionar el tiempo de flotación con la cantidad de mineral flotado. El tipo de ecuación que describe el fenómeno se deduce, bien de presunciones basadas en la teoría, o bien sea de los hechos establecidos por el estudio del mecanismo de la flotación de minerales, o bien, sobre todo por las observaciones empíricas."*

Impartiendo de este concepto, se desarrolla un ejemplo matemático que permita describir el proceso de la flotación, formulado sobre la base de hipótesis, el análisis de observaciones experimentales o del mecanismo de flotación. En este contexto, se han propuesto diversos modelos cinéticos para representar el comportamiento dinámico del proceso.

2.11.1. Modelo empírico

Este modelo se basa en la gráfica obtenida de la recuperación versus el tiempo de flotación, esta grafica es obtenida con datos experimentales y con esto se busca encontrar la relación matemática que representa la curva obtenida.

Para la obtención de datos se realiza una serie de experimentos. Los datos obtenidos deben ser analizados para obtener una información veraz. La desventaja de este modelo es que no permite realizar extrapolaciones con los datos obtenidos. Los modelos son complicados de describir debido a que son sistemas complejos, que tienen una cantidad de variables considerables.

2.11.2. Modelo semi empírico

El modelo semi empírico se basa en la selección de una ecuación diferencial adecuada que permita describir al mineral y su recuperación en función del tiempo, integrándola dentro de límites convenientes. Un ejemplo clásico de este enfoque es el propuesto por Humberto García Zúñiga (1935), quien planteó que para la flotación se sigue una correlación exponencial con respecto al tiempo, para así obtener una recuperación, obteniendo así la Ecuación 11.

$$R = R\alpha\ (\ 1 - \exp(-kt)) \qquad \text{[Ecuación 11]}$$

Donde:

- R = recuperación acumulativa en un tiempo t
- $R\alpha$ = recuperación asintótica (línea recta que se acerca indefinidamente a una curva), cuando t tiende al infinito
- k = constante de velocidad que depende de la adición de reactivos y otras variables
- t = tiempo acumulado de flotación en minutos

Esta ecuación define con exactitud las pruebas de flotación y sus resultados en cada proceso tipo discontinuo, en los cuales no hay un flujo de alimentación ni de relaves.

Para el caso de procesos de flotación con flujo continuo, donde existen flujos y concentraciones constantes, se emplea la siguiente Ecuación 12.

$$R = 1 - (\,1 + Kd\ \ Tr)^{-N} \qquad \text{[Ecuación 12]}$$

Donde:

- R = recuperación en un banco de celdas
- Kd = constante especifico cinético
- N = número de celdas de flotación
- Tr = tiempo de retención de la pulpa en la celda

Existen otros modelos matemáticos para definir la recuperación en función del tiempo en el cual transcurre la flotación. Como la propuesta hecha por Agar y Barret, basada en la ecuación de García Zúñiga, propuesta donde se sostiene que, debido a la incertidumbre de fijar el tiempo inicial para la prueba de flotación, es decir el t = 0, es fundamental introducir un factor de corrección adicional "0", resultando es la Ecuación 13.

$$R = R\alpha\,(\,1 - \,e^{-K(t+0)}) \qquad \text{[Ecuación 13]}$$

En este caso para determinar R se utiliza la regresión exponencial.

En el modelo propuesto por Klimplel, para definir la recuperación se tiene la siguiente Ecuación 14:

$$R = R\alpha\,[1 - \frac{(1-exp-kt)}{kt}] \qquad \text{[Ecuación 14]}$$

Se ha demostrado que, mediante la aplicación de esta ecuación, es posible simular de manera aceptable el comportamiento de un circuito de flotación en régimen continuo.

Además, permite estimar el tiempo óptimo de flotación y resulta útil como herramienta en el diseño y optimización de plantas de procesamiento de minerales.

2.11.3. Modelo Analógico

Se parte de un modelo matemático sacado de los modelos utilizados en ingeniería química. El modelo analógico se fundamenta en conceptos provenientes de la cinética de reacciones químicas, considerando que el proceso de flotación puede asimilarse a una reacción química que tiene lugar en un tanque agitado. Bajo esta analogía, la flotación se modela como una reacción de primer orden, donde la velocidad de recuperación depende de la cantidad de material linealmente aún no recuperado. Aplicando la ley de acción de masas, puede afirmarse que la concentración de mena es proporcional a la velocidad de flotación, como esta concentración va decreciendo a medida que transcurre el proceso, entonces la velocidad de flotación debe decrecer, al menos que exista una causa que modifique este comportamiento, de tal forma que la Ecuación 15 representa la velocidad de flotación se describe de la siguiente manera:

$$VE = -\frac{dC}{dT} = K\ E\ C^n \qquad \text{[Ecuación 15]}$$

Donde:

- *VE:* Velocidad de flotación
- *KE:* Coeficiente especifico de la velocidad de flotación independiente de la concentración de la temperatura
- *n*: orden de reacción, en este caso n es igual a 1

2.11.4. Modelo Analítico

(Astucuri, 1994, pág. 106) *"Se aplican los principios de la hidrodinámica para obtener unas ecuaciones que den cuenta de la probabilidad de encuentro y captura entre las partículas y los glóbulos de gas de mineral, así como de la velocidad de recuperación de los sólidos a partir de la celda."*

A través del modelo analítico se contempla la cinética de flotación enfocándose principalmente en la hidrodinámica donde se describe la ubicación y contacto entre la partícula de mineral y la burbuja, en la cual se describe también las variables conocidas y el mecanismo que actúa en el proceso.

En conclusión, en base a este modelo se puede afirmar que el proceso de flotación no obedece a ningún modelo matemático, porque depende de una gran numero de variables que interviene en el proceso.

CAPITULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

- Mediante la aplicación del proceso de flotación Bulk (Pb-Ag) a nivel experimental, se logra obtener recuperaciones aceptables de Plomo (Pb) y Plata (Ag), las cuales se estiman en un promedio de 80% para el Plomo y 70% para la Plata, superando el rendimiento metalúrgico de las vetas del yacimiento del proyecto minero PERUMING PANA.

3.1.2. Hipótesis Específica

- Una dosificación adecuada del colector Z-11 entre los rangos 2,76 ml a 4,60 ml, permite lograr una adecuada recuperación de plomo (Pb) y plata (Ag).
- Mantener el pH en un rango de 7 a 9 favorece una adecuada recuperación de plomo (Pb) y plata (Ag) durante el proceso de flotación bulk.
- Un porcentaje de sólidos entre 20% a 30% en la pulpa de flotación permite alcanzar una mayor recuperación de plomo (Pb) y plata (Ag) en las pruebas experimentales.

3.2. Variables

3.2.1. Variables Independientes

- Dosificación de Isopropílico de Sodio (Z-11)
- pH
- Porcentaje de Sólidos (%S)

3.2.2. Variables Dependientes

- Recuperación de Pb - Ag

3.3. Indicadores

- Recuperación (%)
- Dosificación de Reactivos (g/t)
- pH (Grado de acidez de la pulpa)
- Porcentaje de Sólidos (Porcentaje)

3.4. Operacionalización de Variable

Tabla 3 *Operacionalización de Variables*

Variable	Tipo	Definición Operacional	Rango	Unidad	Indicadores	Técnicas e Instrumentos
Recuperación de Pb - Ag	Dependiente	Este valor, expresado en porcentaje, representa la eficiencia del proceso de flotación. Se define como la proporción del mineral valioso recuperado en el concentrado respecto al total de dicho mineral presente en el mineral de cabeza.	85 - 92	%	Porcentaje	- Balance Metalúrgico - Análisis Químicos
Dosificación de Reactivos	Independiente	Determinación de la cantidad de reactivo isopropílico de sodio (Z-11) a utilizar durante el proceso.	40 - 100	g/t	gramos / tonelada	- Balanza Electrónica - Pipeteadores digitales
pH	Independiente	Es un parámetro utilizado para determinar el grado de acidez o basicidad de una sustancia. Este valor refleja la concentración de iones hidrógeno (H^+) presentes en la solución y se expresa comúnmente como el **pH**, el cual permite cuantificar la acidez o alcalinidad del medio.	7 - 9	-	Concentración	- Papel tornasol - pH metro
Porcentaje de Sólidos	Independiente	Se refiere al cálculo de la fracción másica de sólidos presentes en la pulpa, la cual se expresa como la proporción entre la masa de sólidos y la masa total de la mezcla (sólidos más líquidos).	20 - 30	%.	Porcentaje	

Nota: *Elaboración Propia*

CAPITULO IV

METODOLOGIA

4.1. Ámbito de Estudio

4.1.1. Información de la Empresa

- Razón Social: PERUMING PANA
- R.U.C.: 10481180347
- Condición: Actitud
- Altitud: 4400 m.s.n.m.
- Ubicación: Centro Poblado de Chilahuito, Paratia, Lampa, Puno

4.1.2. Ubicación Geográfica del Proyecto Minero PERUMING PANA

El proyecto minero PERUMING PANA está localizado en la comunidad de Chilahuito, dentro de la provincia de Paratia, distrito de Lampa, en la región Puno, tal como se aprecia en la Figura 15.

Figura 15

Ubicación del Proyecto Minero PERUMING PANA

Nota: *Ubicación por coordenadas del Proyecto Minero PERUMING PANA. Imagen adaptada de Google Earth.*

4.2. Accesos y Distancias

El acceso al proyecto PERUMING PANA se gestiona a través de dos modalidades principales: la vía aérea y la terrestre. El acceso aéreo se efectúa mediante un vuelo desde la ciudad de Lima hasta la provincia de Juliaca. Por otro lado, el acceso por vía terrestre se realiza a través de dos rutas específicas, las cuales se detallan en la Tabla 4**.**

Tabla 4

Rutas de acceso al Proyecto Minero PERUMING PANA

RUTA	TRAMO	DIST. (Km)	TIEMPO (hora/aprox)	TIPO DE VIA	CONSERVACIÓN
1	Juliaca - Sta Lucia	64	0.8	Asfaltada	Buena
	Sta Lucia – Desvio Llungo	12	0.2	Asfaltada	Buena
	Desvio Yungo -Peruming	25	1	Afirmada	Regular
	TOTAL	**106 km**	**2,0**		
2	Juliaca - Lampa	32	0.5	Asfaltada	Buena
	Lampa - Peruming	40	1.5	Afirmada	Regular
	TOTAL	**72 km**	**2,0**		

Nota: *Adaptado de Estudio Geológico del Proyecto Minero PERUMING PANA.*

4.3. Tipo, Nivel o Método de la Investigación

4.3.1. Tipo de Investigación

La investigación es tipo tecnológica, cuantitativa y experimental, puesto que se aplica los conocimientos teóricos en los experimentos prácticos en laboratorio.

Este estudio se clasifica como una investigación de tipo tecnológico, complementada con una fase experimental en laboratorio. Esta incluye la toma de muestras y el análisis correspondiente, con el objetivo de determinar las variables que influyen de manera significativa en el proceso de flotación bulk.

4.3.2. Nivel de Investigación

Este estudio adopta un enfoque principalmente descriptivo, puesto que se centra en identificar y caracterizar el problema, y en proponer posibles soluciones.

Asimismo, la investigación incluye un componente explicativo, dado que analiza la relación entre la variable dependiente y las variables independientes que influyen en el proceso de flotación.

4.3.3. Método de la Investigación

Para este presente trabajo se aplica el método de investigación experimental, puesto que se realizará la evaluación de las diferentes variables para la obtención de resultados durante el proceso de flotación bulk para las especies del Pb – Ag.

4.4. Diseño de la Investigación

Para el presente estudio se aplicó un diseño factorial 2^3con tres réplicas, el cual permite evaluar de manera sistemática los efectos principales y las interacciones entre las tres variables independientes. Esta metodología experimental facilita identificar no solo

la influencia individual de cada factor, también el efecto combinado de los mismos sobre las variables de respuesta. Las réplicas se incorporaron con el fin de incrementar la precisión estadística, reducir la variabilidad experimental y garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos

4.5. Población y Muestra

4.5.1. Población

Mineral polimetálico de Pb, Zn, Au y Ag, extraído del Proyecto Minero PERUMING PANA- Puno, Lampa, Paratia.

4.5.2. Muestra

La muestra fue obtenida directamente del proyecto minero PERUMING PANA, mediante un muestreo representativo de las vetas en explotación. Posteriormente, se aplicó la técnica de cuarteo en cono con el propósito de conseguir una muestra representativa de 10 kg de mineral polimetálico. La muestra obtenida fue sometida a preparación mecánica y pruebas de flotación Bulk en laboratorio.

4.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección

4.6.1. Técnicas

El desarrollo de la investigación se sustentó en las siguientes metodologías, seleccionadas para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados. Estas metodologías son las siguientes:

- Observación
- Recolección y revisión bibliográfica
- Toma de apuntes (Cada dato tendrá que ser analizado, estudiado y escrito en el cuaderno de apuntes)

- Utilización del programa Excel para el análisis de datos y realizar diferentes balances metalúrgicos.
- Uso del software Minitab para la realización de análisis estadísticos.

4.7. Materiales, Instrumentos y Equipos de Investigación

4.7.1. Materiales de Investigación

- Probetas 10 ml y 25 ml
- Fiola de 100 ml
- Espátula metálica
- Vasos precipitados.
- Fuentes

4.7.2. Instrumentos de Investigación

- Mallas o tamices: 50, 70, 100, 140, 200, 270 y 400
- Papel indicador de pH
- pH-metro
- Cronómetro

4.7.3. Reactivos de Flotación

- Isopropílico de Sodio (z-11)
- Sulfato de Zinc ($ZnSO_4$)
- Cianuro de Sodio (NaCN)
- Aerofloat A – 242
- MIBC ($C_6H_{14}O$)
- Carbonato de Sodio (Na_2CO_3)

4.7.4. Equipos

- Balanza Electrónica
- Chancadora de quijada
- Chancadora de rodillos
- Molino de bolas
- Cuarteador de Jones
- Celda de flotación
- Rotap (Agitador de tamices)
- Pipeteadores
- Software de análisis y procesamiento de datos:

  - Minitab

  - Microsoft Office (Word y Excel)

4.8. Viabilidad

El presente trabajo es viable porque se contó con disponibilidad del laboratorio de procesamiento de minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, tanto así de los equipos y materiales importantes para llevar a cabo la experimentación.

CAPITULO V

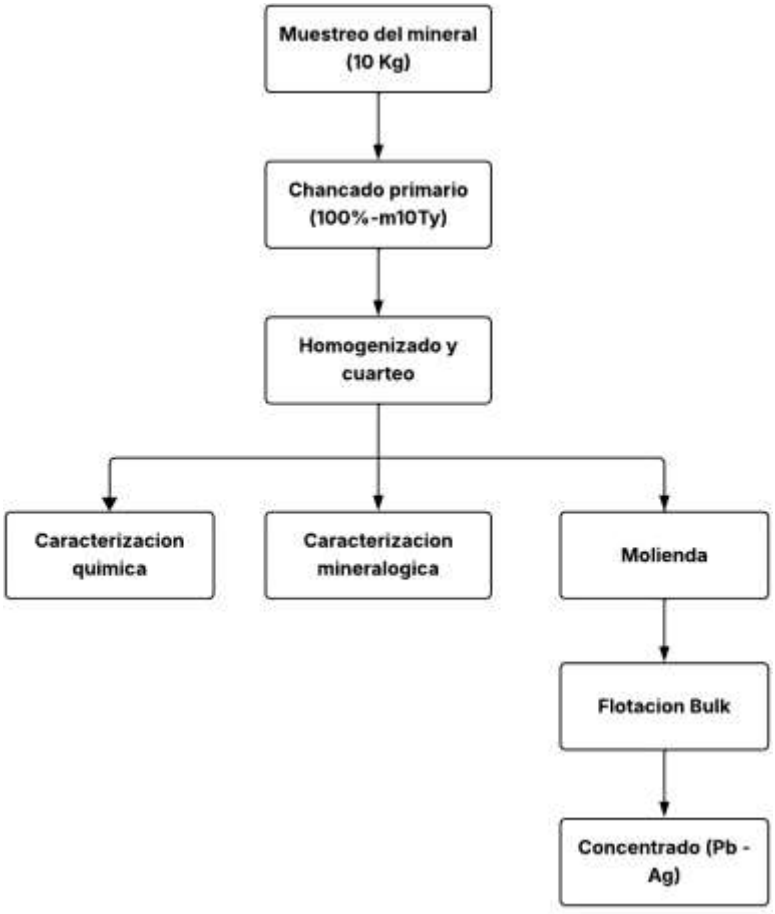
ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Procedimiento Experimental

A continuación, se detalla el desarrollo experimental de las diferentes etapas del trabajo de investigación, organizado en la siguiente Figura 16.

Figura 16

Secuencia de Procedimiento Experimental



Nota: *Adaptación propia de la descripción del procedimiento experimental a escala laboratorio.*

5.2. Preparación Mecánica de minerales (Muestreo de mineral)

Para maximizar la recuperación o el valor de un mineral, es importante reducir su tamaño a una medida óptima. Este proceso de disminución, conocido como conminución, se inicia con la etapa de chancado (Anexo 1.B), donde el mineral se tritura hasta que su tamaño sea inferior a 1/4 de pulgada. Alcanzar este tamaño ideal es fundamental porque prepara el mineral para los procesos posteriores, especialmente para la flotación.

5.2.1. Chancado primario

La preparación mecánica del mineral se realizó en el Laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, en una Chancadora de Quijada hasta conseguir una granulometría de 100% - m10 Ty (Anexo 1.B y Anexo 1.C).

5.2.2. Molienda

Posteriormente el mineral obtenido en la etapa de chancado pasa a la etapa de molienda (Anexo 2.B) hasta conseguir una granulometría de 61% - m100Ty (Anexo 2.D)

5.2.3. Homogenizado y Cuarteo

Después de lograr que el mineral tenga una granulometría de 61% -m100Ty en las etapas previas, es fundamental homogeneizarlo. Para esto, se emplea una técnica común y práctica que consiste en formar un cono con el material. Este cono se divide en cuatro secciones iguales, y luego se toman muestras de las fracciones opuestas hasta obtener aproximadamente 1 kg de subproductos. Estas muestras son cruciales para el análisis químico y mineralógico que se realizará posteriormente.

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

El proyecto Minero PERUMING PANA presenta un cálculo de reservas y recursos minerales de 1’109,105 TMS entre las vetas Mary, Virginia, Española y Buenaventura. De las cuatro vetas, la más importante es la veta Mary que tiene un total de 229100 TMS, entre mineral probado, probable, estimado e inferido presentando en Pb un 3.33%, Ag 1.31 Oz/TC, Au 2.05 gr/TM, Zn 2.52%.

La veta Española presenta un aproximado total de 226200 TMS de mineral polimetálico, con valores de Pb 5.71%, Ag 0.91 Oz/TC, Au 1.35 Gr/TM, Zn 2.50%.

La veta Virginia, tiene un estimado total de 261000 TMS de mineral polimetálico, con valores promedios de Pb 2.10%, Ag 1.1 OZ/TC, Au 1.40 gr/TM, Zn 4.50%.

La veta Buenaventura presenta un total de 295800 TMS de mineral polimetálico, con valores económicos de Pb 3.20%, Ag 1.50 Oz/TC, Au 2.10 gr/TM y Zn 3.60%.

Para llevar a cabo la parte experimental, es fundamental determinar las leyes de cabeza del mineral de muestra. Esto permite su caracterización adecuada y posterior estudio. Con este propósito, se obtuvieron los resultados en el laboratorio LABORATORIOS ANALÍTICOS DEL SUR, ubicado en Parque industrial Rio Seco C-1, Cerro Colorado-Arequipa. La elección de este laboratorio se hizo con el fin de asegurar la veracidad de los resultados de cada muestra obtenida en la prueba experimental, así como se observa las leyes de cabeza de Pb y Ag en la Tabla 5.

Tabla 5

Análisis Químico de Mineral polimetálico

Análisis químico de mineral de cabeza	
Ley de Pb	**Ley de Ag**
Pb (%)	**Ag (g/T)**
14.32	41.5

Nota: *Resultado de análisis químico de cabeza, proporcionado por laboratorio Laboratorios Analíticos del Sur*

5.3. Caracterización del Mineral de Cabeza

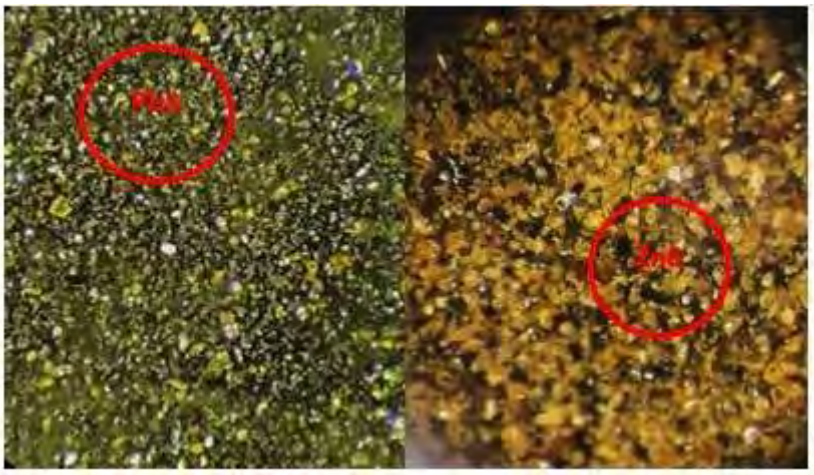
Para poder observar y describir visualmente la muestra de mineral de cabeza, se utiliza una porción de 200 gramos con una granulometría de 60% que pasa la malla 200 Tyler. En esta muestra, se puede apreciar la presencia de diferentes especies, como la galena (PbS) en su estado cristalizado, granos amarillentos que se asocian con que el mineral estaría compuesto de Calcopirita ($CuFeS_2$), el Oro (Au) presentado de manera libre como granos amarillentos cristalizados y el Zinc presentado es su derivado como la esfalerita (ZnS).

Así mismo, también la muestra de cabeza presenta cuarzo blanco en pequeñas cantidades junto a la plata que se encuentra asociada con la limonita que estaría presente gracias a la pirita.

En la Figura 17, se puede apreciar las micrografías obtenidas:

Figura 17

Análisis Mineralógico de la Muestra



Nota: *Microfotografía de PbS y ZnS obtenida en el laboratorio de mineralogía de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, visualización de galena cristalizada asociada con plata y la presencia de esfalerita.*

5.4. Determinación de la Gravedad Especifica del Mineral

La gravedad específica es la relación entre la densidad de un mineral y la del agua (Anexo 3.C), siendo un parámetro esencial para la caracterización del mineral. Para establecer la gravedad específica del mineral, se empleó el método de la probeta. En este procedimiento, se tomó una muestra de 60 gramos con una granulometría de 100% -100 Malla Tyler. La prueba se realizó en una probeta de 100 ml para diferentes muestras de mineral de 20g (Anexo 3.E), la ecuación para establecer la gravedad especifica del mineral es la siguiente:

$$Ge = \frac{m}{Vf - Vi} \qquad \text{[Ecuación 20]}$$

Donde:

- *Ge:* Gravedad Especifica (g/cc)
- *m:* Masa de mineral (g)
- V_f: Volumen final

- V_i: Volumen inicial

En la Figura 18, se puede ver el procedimiento experimental para la determinación de la gravedad especifica mediante el método de la probeta.

Figura 18

Determinación de la Gravedad Específica

Nota: *Imagen de elaboración propia correspondiente a la práctica realizada sobre determinación de gravedad especifica del mineral polimetálico en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.*

En la Tabla 6 se muestra la determinación de la gravedad especifica mediante el método de la probeta.

Tabla 6

Determinación de la Gravedad Especifica

Prueba	Peso (gr)	Vi	Vf	Vm	G.E
1	20	50	57	7	2.86
2	20	50	57	7	2.86
3	20	50	57	7	2.86

Nota: *Adaptación propia*

Por tanto, la gravedad especifica del mineral es de 2.86 g/cc.

5.5. Cinética de molienda

El objetivo del estudio de la cinética de molienda es establecer la curva cinética de molienda, esto debe permitir identificar el tiempo adecuado de molienda para lograr una liberación del 60% de partículas -200 malla.

Para calcular el tiempo de molienda, se utilizó 1 kg de mineral de cabeza con granulometría 100% -10 Malla Tyler, este mineral se sometió a molienda durante distintos lapsos de tiempo: 5, 10, 15 y 20 minutos (Anexo 2.G, 2.H Y 2.I).

5.5.1. Tiempo de Molienda

A partir de los porcentajes de -200 malla para los tiempos de 0, 5, 10, 15 y 20 minutos, se estableció el tiempo de molienda, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7

Determinación del porcentaje - 200 Mallas de las pruebas de molienda

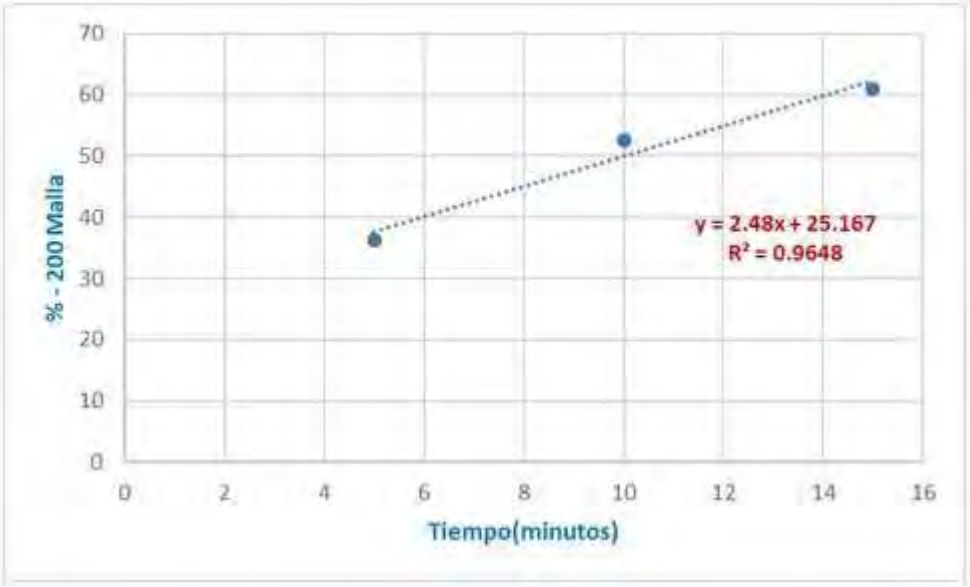
N.° de prueba	Peso de mineral (g)	Tiempo de molienda	% Malla +200	% Malla -200
1	1000	5	63.80	36.2
2	1000	10	47.3	52.7
3	1000	15	39	61

Nota: *Adaptación propia*

Con el uso de Microsoft Excel, se ingresaron los datos de la tabla y se elaboró la gráfica de cinética de molienda, presentada en la Figura 19, donde se aprecia una línea de tendencia junto con su respectiva ecuación lineal.

Figura 19

Gráfico de Cinética de Molienda



Nota: *Gráfico realizado en Microsoft Excel. Imagen de elaboración propia.*

La ecuación de cinética de molienda para el mineral es:

$$Y = 2.48\ X + 25.167 \qquad \text{[Ecuación 21]}$$

Al reemplazar Y en la Ecuación 21 por 60 y resolver para X, se calcula el tiempo de molienda necesario para lograr la liberación de la muestra en 60% -200 Malla Tyler.

$$X = \frac{60 - 25.167}{2.48} = 14.04$$

Se determinó que el tiempo de molienda necesario para obtener una granulometría de 60% a -200 Malla en el molino de laboratorio de procesamiento de minerales corresponde a 14.04 minutos.

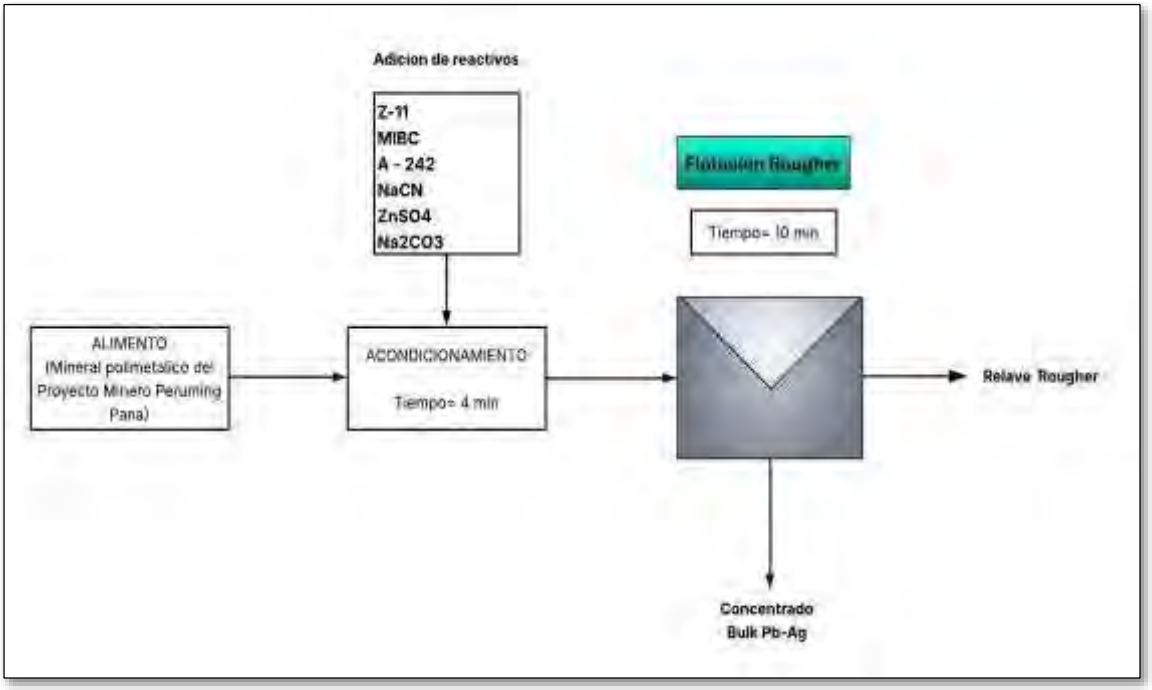
5.6. Desarrollo Experimental de la Flotación Bulk Pb-Ag

Las pruebas experimentales a nivel de laboratorio se llevaron a cabo utilizando una muestra representativa, la cual ha sido previamente caracterizada a través de análisis mineralógicos y la determinación de sus contenidos metálicos. El objetivo principal de esta etapa es producir un concentrado bulk. Para lograrlo, se empleará una dosificación de reactivos de flotación que incluye el Isopropílico de Sodio Z-11 como colector (Anexo 4.B) y Metil Isobutil Carbinol (MIBC) como espumante. Las dosificaciones específicas de estos reactivos se determinarán basándose en información obtenida de fuentes bibliográficas, particularmente tesis enfocadas en la flotación de minerales polimetálicos, lo que asegura un punto de partida fundamentado para las pruebas.

En la figura 20 se puede visualizar el diagrama de flujo del procedimiento de las pruebas de flotación que se realizaron en el laboratorio.

Figura 20

Diagrama de Flujo de pruebas de flotación



Nota: *Adaptación propia de la Elaboración del Diagrama de Flujo para la realización del proceso de flotación bulk.*

5.7. Materiales, reactivos y equipos

5.7.1. Materiales

- Muestra de mineral Proyecto Minero PERUMING PANA
- Probetas de vidrio de 100 ml y 1000 ml
- Mortero de porcelana
- Bandejas de plástico y de metal
- Espátulas
- Agua destilada
- Jeringas para dosificación
- Bagueta de vidrio

5.7.2. Reactivos

- Xantato Isopropílico de Sodio (Z-11)
- Metil Isobutil Carbinol (MIBC)
- Cianuro de sodio (NaCN)
- Aerofloat 242 Promoter (A-242)
- Sulfato de zinc ($ZnSO_4$)
- Carbonato de sodio Na_2CO_3

5.7.3. Equipos

- Chancadora de quijadas
- Molino de bolas
- Celda de flotación Denver 2 L
- Balanza analítica

5.8. Procedimiento Experimental

La fase experimental de las pruebas de flotación se ejecuta mediante una serie de pasos secuenciales:

- Inicialmente, el mineral se pesa considerando el porcentaje de sólidos establecido para cada prueba (20%, 25% y 30%). Acto seguido, se determina la dosificación precisa de los reactivos para cada prueba (Anexo 5.A).
- Se procede a pesar el Carbonato de Sodio que se usara como regulador de pH, este varia para cada prueba de flotación (Anexo 5.B).
- Posteriormente, se adiciona la cantidad previamente determinada de agua y mineral en la celda de flotación, la cual tiene una capacidad de 2 litros.

- Se procede con la preparación del mineral agregando agua a la celda de flotación, junto con ella se adicionan los reactivos de acuerdo al porcentaje de sólidos específicos en cada prueba (Anexo 5.C), luego se empieza con la etapa de acondicionamiento (Anexo 5.D) la cual tiene una duración de 5 minutos.
- En la etapa de acondicionamiento se realiza la medición del pH con el papel tornasol (Anexo 5.E)
- Posteriormente, se inyecta aire en la celda de flotación hasta alcanzar una velocidad de agitación de 1200 RPM (Anexo 5.F).
- Las burbujas cargadas de mineral se recolectan de forma manual con una paleta, depositándolas en una bandeja designada (Anexo 5.G)
- Con el mineral en la bandeja, se deja en reposo hasta que sedimente. La sedimentación permite que los sólidos se acumulen en el fondo y que el agua sobrenadante se aclare, facilitando su decantación sin perturbar el sedimento (Anexo 5.H). El sólido (concentrado o relave) recuperado se prepara para su envío al laboratorio.
- Una vez finalizada la sedimentación, se elimina el agua excedente hasta obtener únicamente el mineral sólido. Posteriormente, este se deja secar a temperatura ambiente y, ya seco, tanto el concentrado como el relave obtenido de cada prueba son debidamente pesados, rotulados y enviados a un laboratorio especializado para realizar la determinación de las leyes mediante análisis químico.
- Posteriormente se realizan los balances metalúrgicos.

5.9. Preparación de la Pulpa para la flotación

Para llevar a cabo las pruebas de flotación, se trabajó con porcentajes de sólidos del 20%, 25% y 30% (Anexo 4.A). Esta selección se basa en la práctica común de la industria

y en diversas investigaciones de laboratorio, donde estas concentraciones son frecuentemente empleadas para optimizar y evaluar el rendimiento del proceso de flotación. En la tabla 8, se puede ver los valores de la cantidad de agua y mineral correspondiente al porcentaje de solidos establecido para cada prueba.

Tabla 8

Preparación de Pulpa

Porcentaje de solidos (%)	Cantidad de mineral (gr)	Cantidad de agua (cm3)
20	459.81	1839.23
25	597.08	1791.23
30	745.44	1739.36

Nota: *Adaptación propia*

5.10. Dosificación de Reactivos

La dosificación de reactivos para la flotación Bulk se define según las condiciones operativas más adecuadas para cada caso. Estas condiciones no se eligen al azar, sino que se determinan a partir de la experiencia acumulada en procesos de flotación y se validan mediante la consulta de fuentes bibliográficas especializadas, incluyendo tesis y trabajos de investigación enfocados en la flotación de minerales polimetálicos.

En la Figura 21 presentada se puede visualizar la dosificación de reactivos que se realizó para cada prueba.

Figura 21

Dosificación de Reactivos

Nota: *Imagen de elaboración propia que muestra el desarrollo de la dosificación de reactivos en el laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.*

5.11. Cálculos de consumos de reactivos de flotación a escala de laboratorio

La adición o dosificación de reactivos con la que se trabajó en el laboratorio, se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Dosificación de Reactivos

REACTIVOS	Solución (%)	Densidad (g/cc)	Consumo (g/T)
Z-11	1	1.16	20-100
MIBC	Puro	0.80	50-100
NaCN	1	1.6	5-25
A-242	Puro	1.2	5-50
ZnSO4	5	1.96	400-500

Nota: *Adaptación propia*

La adición de reactivos en las pruebas de flotación se ajusta directamente al porcentaje de sólidos establecido para cada prueba (20%, 25% o 30%). Esto se debe a que un cambio en el contenido de sólidos en la pulpa implica una alteración en la cantidad de superficie de mineral disponible para reaccionar y en la dinámica físico-química del sistema. Así, una pulpa con mayor porcentaje de sólidos requerirá, en general, una mayor cantidad de reactivos para asegurar una cobertura apropiada de las partículas de mineral y mantener la eficiencia del proceso, mientras que una pulpa más diluida demandará menos reactivo para lograr los mismos efectos de flotación.

La dosificación de reactivos se calcula de acuerdo al porcentaje de solidos correspondiente a cada prueba según la plantilla de diseño experimental.

Para 20% de porcentaje de solidos

- Cálculo para la dosificación de Z-11

$$Z-11 = 460g * \frac{60}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g} = 2.76\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de ZnSO4

$$ZnSO4 = 460g * \frac{500g\ ZnSO4}{10^6} * \frac{100\ cc}{5g\ ZnSO4} = 4.6\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de NaCN

$$NaCN = 460g * \frac{15g\ NaCN}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g\ NaCN} = 0.69\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de A-242

$$A-242 = 460g * \frac{25\ g\ A-242}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g\ A-242} = 1.15\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de MIBC

$$MIBC = 460g * \frac{50}{10^6} * \frac{1\ cc}{0.87\ g} = 0.03\ cc$$

Para 25% de porcentaje de solidos

- Cálculo para la dosificación de Z-11

$$Z-11 = 597g * \frac{60}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g} = 3.58\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de ZnSO4

$$ZnSO4 = 597g * \frac{500g\ ZnSO4}{10^6} * \frac{100\ cc}{5g\ ZnSO4} = 5.97\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de NaCN

$$NaCN = 597g * \frac{15g\ NaCN}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g\ NaCN} = 0.9\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de A-242

$$A-242 = 597g * \frac{25\ g\ A-242}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g\ A-242} = 1.49\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de MIBC

$$MIBC = 597g * \frac{50}{10^6} * \frac{1\ cc}{0.87\ g} = 0.034\ cc$$

Para 30% de porcentaje de solidos

- Cálculo para la dosificación de Z-11

$$Z-11 = 745g * \frac{60}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g} = 4.6\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de ZnSO4

$$ZnSO4 = 745g * \frac{500g\ ZnSO4}{10^6} * \frac{100\ cc}{5g\ ZnSO4} = 7.45cc$$

- Cálculo para la dosificación de NaCN

$$NaCN = 745g * \frac{15g\ NaCN}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g\ NaCN} = 1.12cc$$

- Cálculo para la dosificación de A-242

$$A-242 = 745g * \frac{25\ g\ A-242}{10^6} * \frac{100\ cc}{1\ g\ A-242} = 1.86\ cc$$

- Cálculo para la dosificación de MIBC

$$MIBC = 745g * \frac{50}{10^6} * \frac{1\ cc}{0.87\ g} = 0.042cc$$

5.12. Pruebas de Experimentación de Flotación Bulk en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales

En total se realizaron 11 pruebas de flotación, estas pruebas se realizaron mediante los siguientes parámetros operativos establecidos, descritos a continuación para cada prueba.

5.12.1. Prueba de Flotación N°1

Las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	20%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	7
pH	2.76

Nota: *Adaptación propia*

En la Tabla 11, se puede visualizar el balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº 1.

Tabla 11

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°1

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	458.7	14.32	41.5	65.69	0.019	100	100
Concentrado	172.6	28.76	65.9	49.54	0.011	75.6	59.7
Relave	286.1	5.624	20.8	16.15	0.008	24.4	40.3

Nota: *Adaptación propia*

5.12.2. Prueba de Flotación N°2

La siguiente Tabla 12, se muestra las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº 2.

Tabla 12

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	20%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	4.6
pH	7

Nota: *Adaptación propia*

El balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación 2 se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°2

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	458.3	14.32	41.5	65.62	0.019	100	100
Concentrado	184.1	28.75	65.9	54.50	0.013	80.7	63.7
Relave	274.2	4.056	21.4	11.12	0.006	19.3	36.3

Nota: *Adaptación propia*

5.12.3. Prueba de Flotación N°3

La Tabla 14, muestra las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº 3.

Tabla 14

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	20%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	2.76
pH	9

Nota: *Adaptación propia*

En la Tabla 15, se puede visualizar el balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº 3.

Tabla 15

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°3

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	458.7	14.32	41.5	65.68	0.019	100	100
Concentrado	178.4	28.74	65.9	50.84	0.013	78.1	61.7
Relave	280.3	5.296	20.6	14.84	0.006	21.9	38.3

Nota: *Adaptación propia*

5.12.4. Prueba de Flotación N°4

En la Tabla 16 se muestra las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº4.

Tabla 16

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	20%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	4.6
pH	9

Nota: *Adaptación propia*

La Tabla 17 muestra la visualización del balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº4.

Tabla 17

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°4

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	458.1	14.32	41.5	65.59	0.019	100	100
Concentrado	186.4	29.35	86.2	55.22	0.016	83.4	84.4
Relave	271.8	3.623	20.4	10.37	0.003	16.6	15.6

Nota: *Adaptación propia*

5.12.5. Prueba de Flotación N°5

La Tabla 18, muestra las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº5.

Tabla 18

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	30%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	2.76
pH	7

Nota: *Adaptación propia*

La Tabla 19 muestra la visualización del balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº 5.

Tabla 19

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°5

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	739.1	14.32	41.5	105.83	0.031	100	100
Concentrado	270.25	29.18	83.3	79.10	0.021	74.5	73.3
Relave	468.85	5.651	22.0	26.73	0.009	25.5	26.7

Nota: *Adaptación propia*

5.12.6. Prueba de Flotación N°6

Las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº6 se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	30%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	4.6
pH	7

Nota: *Adaptación propia*

En la Tabla 21, se puede visualizar el balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº6.

Tabla 21

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°6

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	743	14.32	41.5	106.39	0.031	100	100
Concentrado	300.45	27.26	77.5	82.41	0.022	77.0	75.4
Relave	442.55	5.304	21.2	23.98	0.008	23.0	24.6

Nota: *Adaptación propia*

5.12.7. Prueba de Flotación N°7

En la Tabla 22 se muestra las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº 7.

Tabla 22

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	30%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	2.76
pH	9

Nota: *Adaptación propia*

El balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº7 se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°7

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico(g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	741.3	14.32	41.5	106.14	0.031	100	100
Concentrado	276.7	29.17	83.3	80.71	0.023	76.0	74.9
Relave	464.6	5.304	21.2	24.64	0.010	24.0	25.1

Nota: *Adaptación propia*

5.12.8. Pruebas de Flotación N°8

En la Tabla 24, muestra las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº 8.

Tabla 24

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	30%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	4.6
pH	9

Nota: *Adaptación propia*

En la Tabla 25, se puede visualizar el balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº 8.

Tabla 25

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°8

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	744.5	14.32	41.5	106.60	0.031	100	100
Concentrado	318.7	27.26	77.5	88.96	0.024	81.5	79.9
Relave	425.8	3.654	20.2	17.64	0.007	18.5	20.1

Nota: *Adaptación propia*

5.12.9. Prueba de Flotación N°9

Las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº 9 se observan en la Tabla 26.

Tabla 26

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	25%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	3.58
pH	8

Nota: *Adaptación propia*

En la Tabla 27, se puede visualizar el balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº 9.

Tabla 27

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°9

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	596.6	14.32	41.5	85.43	0.025	100	100
Concentrado	188.85	35.75	77.3	66.13	0.016	79.0	58.9
Relave	407.75	5.07	18.0	19.29	0.009	21.0	41.1

Nota: *Adaptación propia*

5.12.10. Prueba de Flotación N°10

Las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº 10 se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	25%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	3.58
pH	8

Nota: *Adaptación propia*

En la Tabla 29 se puede visualizar el balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº10.

Tabla 29

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°10

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	596.5	14.32	41.5	85.41	0.025	100	100
Concentrado	187.5	35.77	77.3	65.58	0.015	78.5	58.5
Relave	409	5.214	22.1	19.83	0.010	21.5	41.5

Nota: *Adaptación propia*

5.12.11. Prueba de Flotación N°11

En la Tabla 30, se muestra las condiciones operativas tanto en molienda como en flotación para realizar la prueba Nº 11.

Tabla 30

Condiciones Operativas para Flotación Bulk

Molienda	
Granulometría	60%-200 malla
Flotación	
Porcentaje de solidos	25%
Etapa de acondicionamiento (min)	5
Flotación Rougher (min)	10
Dosificación Z-11 (cc)	3.58
pH	8

Nota: *Adaptación propia*

En la siguiente Tabla 31 se puede visualizar el balance metalúrgico realizado para la prueba de flotación Nº11.

Tabla 31

Balance Metalúrgico prueba de Flotación N°11

Producto	**Peso (g)**	**Leyes**		**Contenido metálico (g)**		**Recuperación (%)**	
		Pb (%)	**Ag (g/t)**	**Pb**	**Ag**	**Pb**	**Ag**
Cabeza	596.5	14.32	41.5	85.41	0.025	100	100
Concentrado	188.2	35.77	77.3	65.95	0.015	78.8	58.7
Relave	408.3	5.104	21.6	19.47	0.010	21.2	41.3

Nota: *Adaptación propia*

La Tabla 32 presenta un resumen de los balances metalúrgicos. En ella se destacan las leyes de plomo y plata, lo que indica la calidad de los concentrados. Adicionalmente, la tabla muestra las recuperaciones totales de oro y plata logradas en el proceso.

Tabla 32

Recuperaciones y leyes de pruebas de flotación

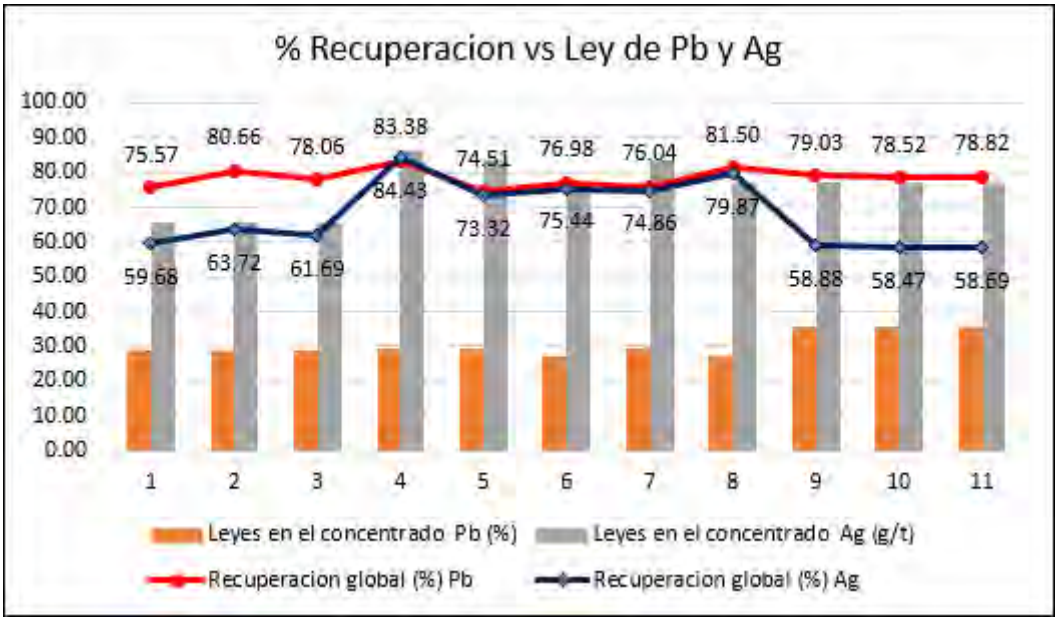
Prueba	Leyes en el concentrado		Recuperación global (%)	
	Pb (%)	Ag (g/t)	Pb	Ag
1	28.76	65.87	75.57	59.68
2	28.75	65.87	80.66	63.72
3	28.74	65.87	78.06	61.69
4	29.35	86.20	83.38	84.43
5	29.18	83.28	74.51	73.32
6	27.26	77.48	76.98	75.44
7	29.17	83.29	76.04	74.86
8	27.26	77.49	81.50	79.87
9	35.75	77.25	79.03	58.88
10	35.77	77.26	78.52	58.47
11	35.77	77.26	78.82	58.69

Nota: *Adaptación propia*

En la figura 22, se puede observar el gráfico del análisis de las once pruebas realizadas, la prueba 4 constituye la condición más favorable, alcanzando una recuperación global de 83.38% para Pb **y** 84.43% para Ag, además de una ley de Ag en el concentrado de 74.51 g/t, lo que representa el mejor balance metalúrgico obtenido en el circuito de flotación Bulk. De forma complementaria, la prueba 8 mostró también resultados destacados, con 81.50% de recuperación de Pb **y** 79.87% de recuperación de Ag, posicionándola como una segunda alternativa eficiente. Estos mejores resultados se deben a que en dichas pruebas se trabajó con una dosificación adecuada del colector Z-11, junto con un pH elevado **y** un porcentaje de sólidos relativamente bajo, condiciones que favorecieron la flotación Bulk.

Figura 22

Gráfico de barras del % de Recuperación Pb/Ag vs. Ley de Pb/Ag



Nota: *Gráfico del versus del porcentaje de recuperación y la ley de plomo y plata realizado en Microsoft Excel.*

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Planificación de Análisis Estadísticos

El presente análisis de resultados experimentales se centra en evaluar la influencia de dosificación de colector Z-11, el pH y el porcentaje de sólidos sobre el objetivo fundamental de la presente investigación. Para establecer la relación entre la variable dependiente (Y) y las variables independientes (X1, X2, X3), se realizaron pruebas de contraste de hipótesis con la información corregida obtenida en la fase experimental.

La formulación de hipótesis en el perfil de investigación debe ser contrastada con los resultados empíricos, especialmente para probar la interacción de las tres variables. Para esto, se empleó un modelo de regresión y correlación lineal, el cual permitió evaluar la relación existente entre la variable dependiente y las variables independientes. El modelo de regresión se expresa de la siguiente manera: $Y=\beta0+\beta1X1+\beta2X2+\beta3X3\ldots$.

El objetivo de este análisis estadístico es construir un modelo de regresión que permita evaluar la recuperación de plomo y plata para el mineral polimetálico proveniente del proyecto minero PERUMING PANA. La aplicación de la regresión lineal facilitó la predicción de los valores de las variables de interés.

Para determinar el impacto de las variables independientes de investigación en las variables respuesta (% recuperación de plomo y plata), realizamos cálculos de regresión factorial utilizando el software MINITAB.

6.2. Resultados de las Pruebas Metalúrgicas

Los resultados del capítulo previo fueron importantes para la evaluación de las variables de investigación. Esta evaluación se ejecutó empleando un diseño factorial de 2^3 con tres puntos centrales, en total 11 pruebas.

El diseño factorial completo se realizó empleando una matriz de diseño que contuvo tanto la escala codificada como la natural de los factores. Esta matriz guio el establecimiento de las condiciones operativas óptimas para la flotación bulk. La Tabla 33 muestra la plantilla de diseño experimental codificada y real.

Tabla 33

Plantilla de Diseño Experimental Codificada y Real

Nº Prueba	Escala natural			Escala codificada			Y (% recuperación)	
	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Pb	Ag
1		-	-	2.76	7	20.00	75.6	59.7
2	+	-	-	4.6	7	20.00	80.7	63.7
3	-	+	-	2.76	9	20.00	78.1	61.7
4	+	+	-	4.6	9	20.00	83.4	84.4
5	-	-	+	2.76	7	30.00	74.5	73.3
6	+	-	+	4.6	7	30.00	77.0	75.4
7	-	+	+	2.76	9	30.00	76.0	74.9
8	+	+	+	4.6	9	30.00	81.5	79.9
9	0	0	0	3.58	8	25.00	79.0	58.9
10	0	0	0	3.58	8	25.00	78.5	58.5
11	0	0	0	3.58	8	25.00	78.8	58.7

Nota: *Adaptación propia*

6.3. Variables Consideradas

Se realizo el análisis estadístico mediante el método de regresión lineal múltiple, considerando tanto los efectos principales, así como las interacciones entre las variables independientes. Las variables involucradas ya se definieron en el capítulo previo; es

importante destacar que la investigación cuenta con dos variables dependientes y tres variables independientes, las cuales se detallan a continuación.

- Y1= % Recuperación de Pb
- Y2= % Recuperación de Ag
- X1= Reactivo colector Z-11
- X2= pH
- X3= % de solidos

6.4. Hipótesis de interés a verificar

La hipótesis principal de la presente investigación es que, al aplicar el proceso de flotación Bulk (Pb-Ag), se logrará una mejora significativa en la recuperación de plomo (Pb) y plata (Ag). Para validar esta premisa, se utilizó un enfoque estadístico basado en el Diseño de Experimentos (DOE) con un modelo factorial, complementado con análisis de regresión y gráficos estadísticos (gráficos de Pareto, superficies de respuesta, cubos de interacción, entre otros). Estas herramientas permitieron analizar el impacto de las variables independientes y sus interacciones sobre la variable de respuesta, lo que permitió contrastar y verificar la hipótesis planteada.

Con este análisis, se buscó determinar si el modelo es útil para explicar la variable respuesta Y. Para ello, planteamos las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis Nula (H_0):** $\beta 1=0$. Esto significa el modelo no logra explicar la variación observada en la variable respuesta Y. En otras palabras, los predictores no tienen un efecto significativo.

- **Hipótesis Alterna (H_a)**: $\beta 1 \neq 0$. Esto significa el modelo si logra explicar la variación observada en la variable respuesta Y. Es decir, al menos uno de los predictores sí tiene un efecto significativo.

6.5. Estimación de Coeficiente de Regresión Lineal

En la Tablas 34 y Tabla 35 y se muestra la estimación de parámetros del modelo de regresión para el porcentaje de recuperación de Pb y Ag.

Tabla 34

Efectos estimados sobre el porcentaje de recuperación de plomo (Pb) en unidades codificadas

Término	Efecto	Coef.	EE del Coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		75.937	0.29	261.73	0	
z-11	6.071	3.035	0.339	8.94	0.001	1
Ph	3.249	1.625	0.34	4.78	-0.009	1
% solidos	-1.987	-0.993	0.34	-2.92	0.043	1
z-11*Ph	0.636	0.318	0.34	0.94	0.402	1
z-11*% solidos	-1.537	-0.769	0.34	-2.26	0.087	1
Ph*% solidos	1.111	0.555	0.34	1.63	0.178	1

Nota: *Adaptación propia*

La Tabla 35 presenta los coeficientes calculados para un modelo de regresión lineal. Este modelo fue desarrollado empleando un diseño experimental factorial 2^3, lo que significa que se investigaron tres variables experimentales, cada una con dos niveles. Los coeficientes presentados en la tabla permiten entender cómo influyen individualmente cada variable (efectos principales) y cómo la combinación de estas variables (interacción) afecta el resultado.

El modelo de regresión lineal desarrollado identificó a **Z-ll, pH, y % sólidos** como factores individuales estadísticamente significativos ($p < 0.05$) sobre la variable de respuesta. Específicamente, z-ll y pH mostraron efectos positivos, indicando que un aumento en sus valores incrementa la respuesta, siendo Z-ll el de mayor impacto (coeficiente de 6.071). Por el contrario, el % sólidos ejerció un efecto negativo (coeficiente de -1.987), sugiriendo que un incremento en este factor disminuye la respuesta. Es importante destacar que ninguna de las interacciones binarias entre los factores (Z-ll*pH, Z-ll*% sólidos, pH*% sólidos) resultó ser estadísticamente significativa ($p > 0.05$), lo cual simplifica la interpretación al indicar que los efectos de cada factor son mayormente independientes entre sí, facilitando la optimización individual de cada parámetro para alcanzar el objetivo deseado.

Tabla 35

Efectos estimados sobre el porcentaje de recuperación de plata (Ag) en unidades codificadas

Término	Efecto	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		64.939	0.864	75.14	0	
z-11	3.59	1.79	1.01	1.77	0.151	1
pH	3.31	1.66	1.01	1.64	0.177	1
% solidos	1.76	0.88	1.01	0.87	0.435	1
z-11*pH	1.15	0.58	1.01	0.57	0.6	1
z-11*% solidos	-1.88	-0.94	1.01	-0.93	0.405	1
Ph*% solidos	-1.88	-0.94	1.01	-0.93	0.407	1

Nota: *Adaptación propia*

En la Tabla 35 puede notarse que el análisis de regresión lineal reveló que, al examinar los efectos individuales y las interacciones, se observa que ninguno de los factores (Z-ll, pH, % sólidos) ni sus interacciones (Z-ll*pH, Z-ll*% sólidos, pH*% sólidos) resultaron ser estadísticamente significativos ($p > 0.05$). Esto se evidencia por

los altos valores p para todos los términos (0.151 para Z-ll, 0.177 para pH, 0.435 para % sólidos, 0.6 para z-ll*pH, 0.405 para Z-ll*% sólidos y 0.407 para pH*% sólidos). Estos resultados sugieren que, dentro del rango experimental estudiado y con el nivel de confianza utilizado, no hay una influencia estadísticamente significativa de estos factores sobre la variable de respuesta, o que el modelo lineal no logra capturar adecuadamente dicha relación.

La ecuación de regresión en unidades no codificadas que nos brindó el software MINITAB para el porcentaje de recuperación Pb y Ag esta dado por las siguientes expresiones:

- ***Y1 = 72.8 + 4.71 Z-11 - 2.43 pH - 0.472 % solidos+ 0.346 Z-11*pH - 0.17 Z-11*%solidos + 0.11 pH*%solidos***
- ***Y2 = 2.2 + 2.1 Z-11 + 4.04 pH + 2.43 %solidos + 0.63 Z-11*pH - 0.21 Z-11*%solidos – 0.19 pH*%solidos***

6.6. Medida de Coeficiente de Determinación R^2

El coeficiente de determinación (R^2) expresa la proporción de la variabilidad total de la variable dependiente que es explicada por el modelo de regresión lineal. En otras palabras, señala el porcentaje de varianza de los datos que el modelo logra capturar. Un valor elevado de R^2 refleja que el modelo se ajusta adecuadamente a la información disponible.

Las siguientes tablas (Tabla 36 y Tabla 37) presentan los resultados del análisis de regresión, realizado con el software Minitab, acerca de la recuperación plomo, plata (%). Estos datos detallan la influencia de las variables investigadas en dicha recuperación.

Tabla 36

Coeficientes del Modelo de Regresión Recuperación de Pb

Estadísticas de regresión Recuperación Pb	
Coeficiente de determinación R^2	96.77
R^2 ajustado	91.93
Error típico (S)	4.2

Nota: *Adaptación propia*

Los resultados del análisis de regresión, presentados en la Tabla 37 demuestran que el modelo lineal es altamente efectivo para definir la variabilidad en el porcentaje de recuperación de plomo (Pb). El coeficiente de determinación (R^2) del 96.77% muestra que las variables independientes (% Sólidos, pH y Z-11) explican casi la totalidad de la variabilidad observada en la recuperación de Pb. Adicionalmente, el R^2 ajustado del 91.93% confirma la robustez del modelo, al corregir por el número de predictores, asegurando que la alta capacidad explicativa no se debe a un ajuste artificial.

Finalmente, el error típico (S) de 4.2 sugiere que las estimaciones generadas por el modelo para la recuperación de plomo son bastante precisas, con una desviación promedio de ±4.2 puntos porcentuales respecto a los valores reales. Estos indicadores colectivamente validan la alta predictibilidad y el buen ajuste del modelo propuesto.

Tabla 37

Coeficiente del modelo de Regresión Recuperación de Ag

Estadísticas de regresión Recuperación Ag	
Coeficiente de determinación R^2	63.32
R^2 ajustado	20.8
Error típico (S)	0.2

Nota: *Adaptación propia*

La Tabla 37 muestra el modelo de regresión para la recuperación de plata (Ag) explica inicialmente el 63.32% de la variabilidad (R^2). Sin embargo, al ajustar por el número de variables, esta capacidad explicativa real se reduce drásticamente a solo un 20.8% (R^2 ajustado), lo que sugiere que las variables usadas en el modelo no son relevantes para predecir la recuperación de Ag.

6.7. Prueba de hipótesis ANOVA

La prueba de hipótesis ANOVA es una prueba estadística que determina si factores influyen significativamente en una respuesta continua, al comparar variabilidades. Un valor p bajo ($\leq\alpha$) indica un efecto significativo.

Tabla 38

Análisis de variaciones ANOVA (% Recuperación de Pb)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	110.965	18.4941	20	0.006
Lineal	3	102.962	34.3206	37.11	0.002
Z-11	1	73.951	73.9507	79.96	0.001
Ph	1	21.118	21.1178	22.83	0.009
% solidos	1	7.893	7.8933	8.53	0.043
Z-11*Ph	1	1	0.81	0.8099	0.88
Z-11*%solidos	1	1	4.725	4.7253	5.11
Ph*%solidos	1	1	2.468	2.4678	2.67
Error	4	3.699	0.9248		
Total	10	114.664			

Nota: *Adaptación propia*

El Análisis de Varianza (ANOVA) para la Recuperación de Plomo (Pb) fue realizado con el fin de evaluar la significancia estadística del modelo de regresión y de cada uno de sus componentes (variables independientes e interacciones). Los resultados, que se muestran en la Tabla 38, se interpretan comparando los "Valores p" obtenidos con un nivel de significancia preestablecido (α), comúnmente de 0.05.

En primer lugar, el modelo de regresión en su conjunto es estadísticamente significativo, como lo demuestra un Valor p de 0.006, el cual es menor que 0.05. Esto valida la utilidad del modelo para predecir la Recuperación de Pb. Al examinar los efectos individuales de las variables, se observa que Z-11 (Valor p = 0.001), pH (Valor p = 0.009) y % sólidos (Valor p = 0.043) son factores individualmente significativos en la explicación de la Recuperación de Plomo, dado que todos sus Valores p son inferiores a 0.05. Entre las interacciones de segundo orden, la interacción entre Z-11 y % sólidos es estadísticamente significativa (Valor p = 0.04), lo que implica que el efecto de una de

estas variables sobre la Recuperación de Pb depende del nivel de la otra. Por el contrario, las interacciones entre Z-11 y pH (Valor p = 0.88), y entre pH y % sólidos (Valor p = 0.17), no resultaron ser estadísticamente significativas, ya que sus Valores p son mayores a 0.05. Esto sugiere que estas interacciones no tienen un impacto combinado relevante en la Recuperación de Pb.

En síntesis, los resultados de ANOVA confirman que Z-11, pH, % sólidos, y la interacción entre Z-11 y % sólidos, son los factores clave que influyen en el porcentaje de Recuperación de Plomo.

Tabla 39

Análisis de varianza ANOVA (Recuperación de Ag)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	70.781	11.797	1.44	0.378
Lineal	3	53.974	17.991	2.19	0.231
z-11	1	25.843	25.843	3.15	0.151
pH	1	21.961	21.961	2.68	0.177
% solidos	1	6.17	6.17	0.75	0.435
z-11*pH	1	2.657	2.657	0.32	0.6
z-11*% solidos	1	7.104	7.104	0.87	0.405
pH*% solidos	1	7.046	7.046	0.86	0.407
Error	4	32.821	8.205		
Total	10	103.602			

Nota: *Adaptación propia*

El análisis ANOVA para la Recuperación de Plata se muestra en la Tabla 39, donde se reveló que ninguno de los factores estudiados (z-11, pH, % de solidos) ni sus interacciones muestran una influencia estadísticamente relevante en la variable respuesta (todos los p-valores son superiores a 0.05).

6.8. Interpretación de gráficas del diseño factorial

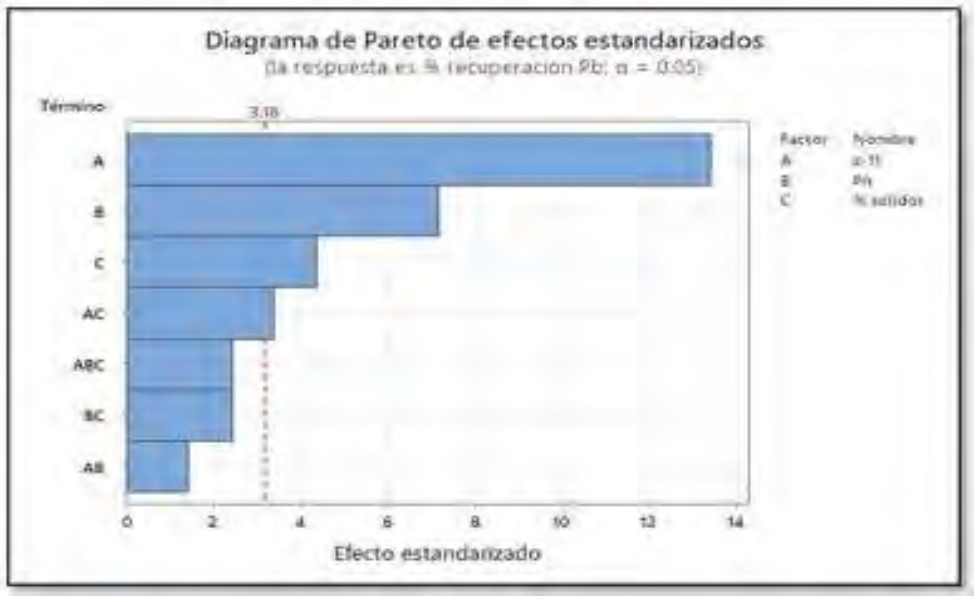
6.8.1. Diagrama Pareto y Efectos principales para el porcentaje de recuperación de Plomo y Plata

Un diagrama de Pareto es un gráfico que nos ayuda a reconocer cuáles son los factores más significativos (variables independientes) que influyen en un resultado determinado (la variable respuesta). En las siguientes figuras se puede apreciar el diagrama de Pareto para la recuperación de plomo y plata (%).

En la Figura 23 se aprecia el Diagrama de Pareto para el porcentaje de Recuperación de Pb indica que los factores individuales z-11 (A), pH (B) y % solidos (C), junto con la interacción z-11 * % solidos (AC), tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la respuesta. Esto se debe a que sus barras de "Efecto Estandarizado" cruzan la línea de referencia (valor crítico de t) de 3.18, establecida para un α=0.05. Las demás interacciones (AB, BC, ABC) no son significativas.

Figura 23

Diagrama de Pareto de efectos para el porcentaje de Recuperación de Pb

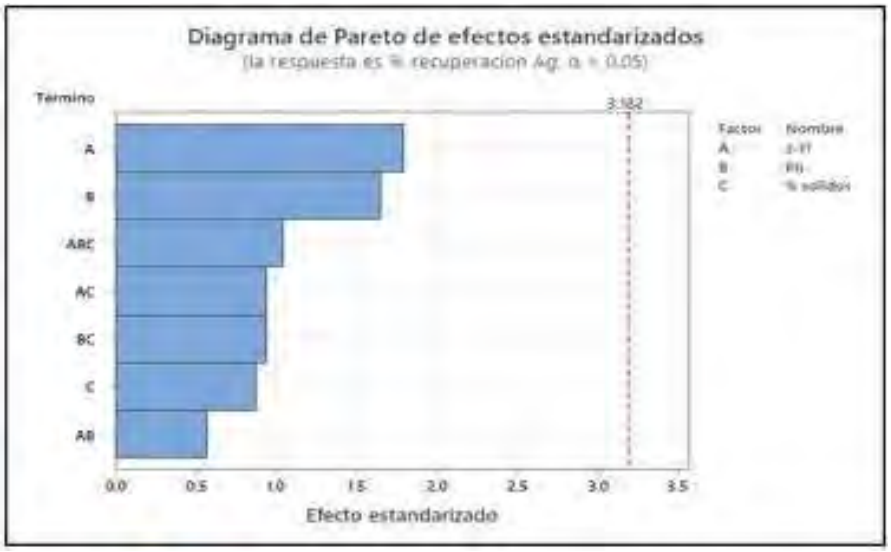


Nota: *Gráfico elaborado en MINITAB versión 22.*

El Diagrama de Pareto para % Recuperación de Plata muestra que ningún factor ni interacción (z-11, pH, % solidos) alcanza la línea de significancia (3.182 para α=0.05). Esto sugiere que no se cuenta con evidencia estadística de que estos términos influyan significativamente respecto a la recuperación de plata en las condiciones analizadas. en la recuperación de plata bajo las condiciones evaluadas.

Figura 24

Diagrama de Pareto de efectos para el porcentaje de Recuperación de Ag



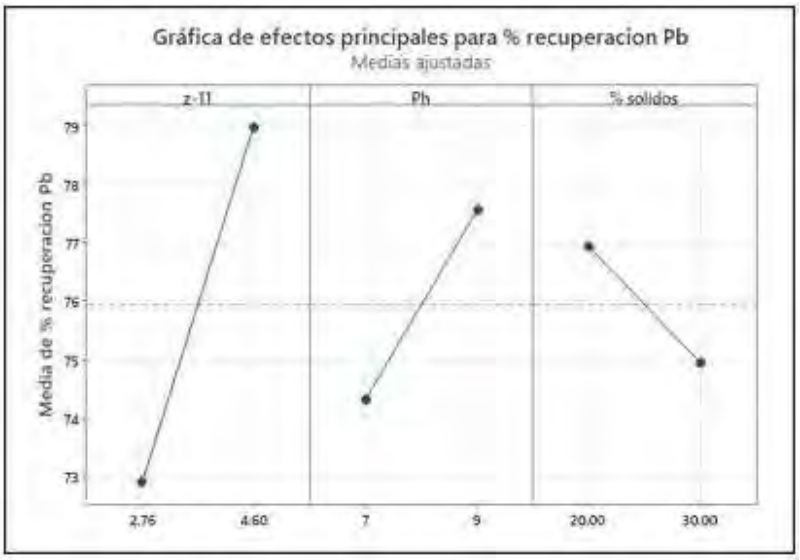
Nota: *Gráfico elaborado en MINITAB versión 22.*

6.8.2. Gráfica de efectos principales para él % de recuperación de Pb

La figura 25 muestra la gráfica de efectos principales para el porcentaje recuperación Pb.

Figura 25

Gráfico de Efectos principales para la Recuperación de Pb (%)



Nota: *Gráfico elaborado en MINITAB versión 22.*

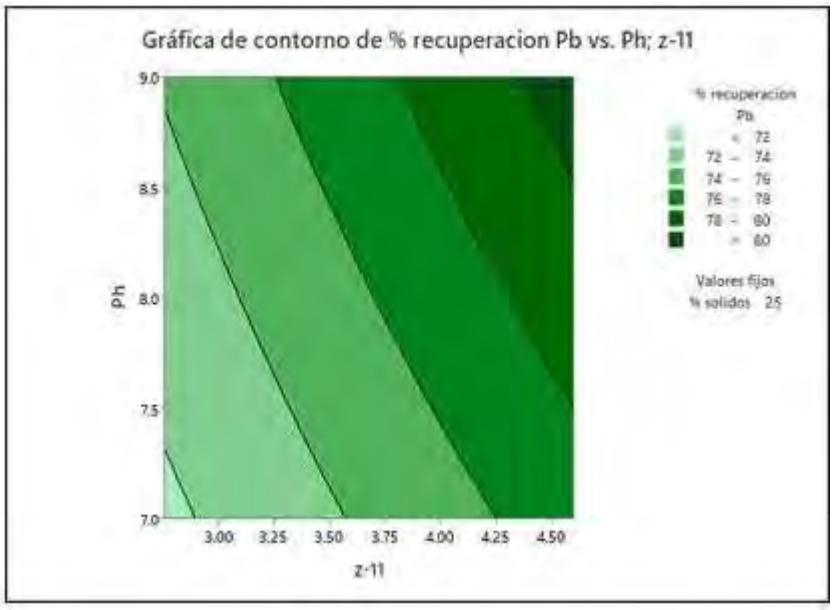
El grafico de Efectos Principales para % Recuperación de Pb ilustra claramente el impacto individual de cada factor en la media de la variable de respuesta. Se visualiza que el factor Z-11 ejerce influencia positiva, dado que su incremento de 2.76 a 4.60 resulta en un notable aumento de la recuperación. De manera similar, el pH muestra un efecto positivo, con una media de recuperación incrementándose al pasar de un pH de 7 a 9. Por otro lado, el % solidos exhibe un efecto principal negativo, donde un aumento de 20.00 a 30.00 en su nivel conduce a una disminución en la recuperación de plomo. Estos hallazgos visuales son críticos para la optimización del proceso, indicando las direcciones en las que cada factor debe ajustarse para llevar al máximo la recuperación de plomo.

6.8.3. Gráfica de contorno % recuperación Pb

La Figura 26 muestra la gráfica de efectos principales para porcentaje de recuperación Pb.

Figura 26

Gráfica de contorno de % de Recuperación Pb vs. Ph; Z-11



Nota: *Gráfico elaborado en MINITAB versión 22.*

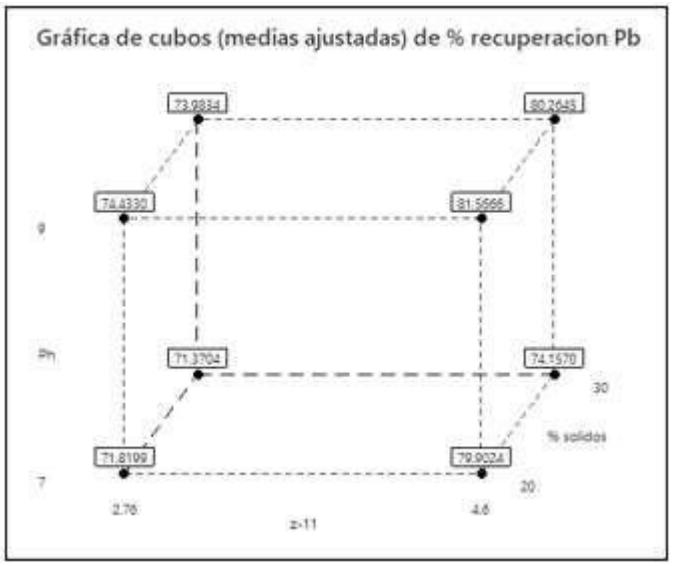
La gráfica de Contorno para % Recuperación de Pb revela que la máxima eficiencia se logra con valores altos de z-11 y pH, manteniendo el % solidos fijo en 25. Las regiones de mayor recuperación (superiores al 80%) se concentran en la esquina superior derecha del gráfico (Z-11 y pH elevados), indicando una clara tendencia de aumento de la recuperación de plomo al incrementar ambos factores simultáneamente dentro del rango estudiado.

6.8.4. Gráfico de cubos de % Recuperación de Pb

La Figura 27 muestra la gráfica de cubos (medias ajustadas) para % recuperación Pb.

Figura 27

Gráfica de cubos (medias ajustadas) de % de recuperación de Pb



Nota: *Gráfico elaborado en MINITAB versión 22.*

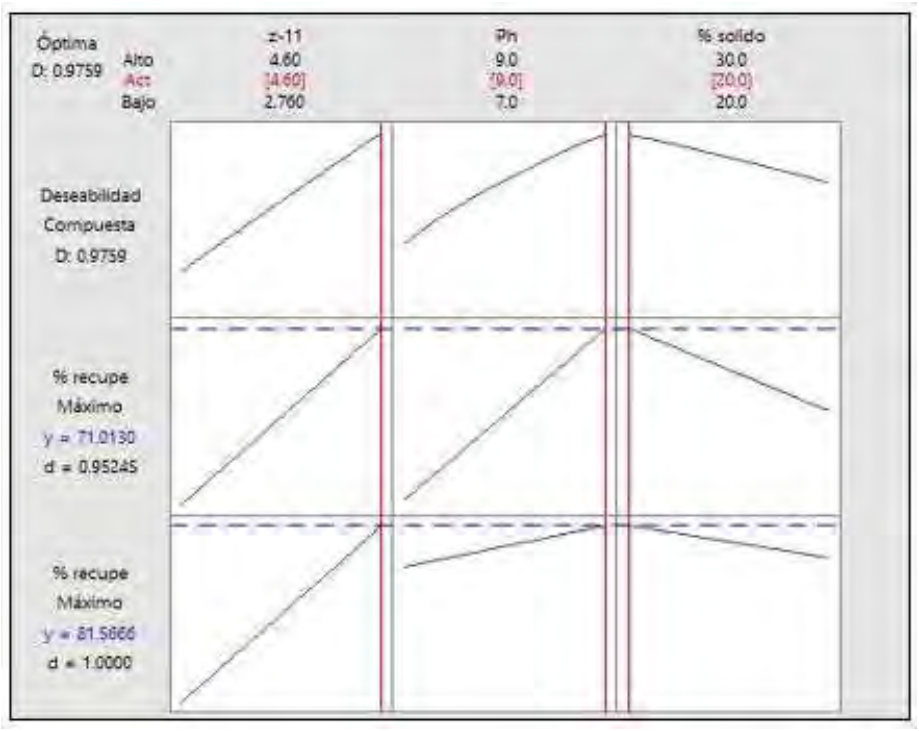
La Figura 27 muestra el Gráfico de Cubos de las medias ajustadas para % Recuperación de Pb donde se ve el comportamiento de la respuesta en los niveles extremos de los factores. Este gráfico confirmó visualmente que las mayores recuperaciones de plomo se obtienen con la combinación de niveles altos de z-11 (4.6) y pH (9), y un nivel bajo dé % solidos (20). Específicamente, la media ajustada más alta de 81.5666% se observó en estas condiciones, reforzando los efectos individuales positivos de Z-11 y pH, y el efecto negativo de % solidos, previamente identificados en los análisis de Pareto y efectos principales. Esta representación tridimensional del espacio de diseño es fundamental para comprender las combinaciones de factores que optimizan la recuperación de plomo.

6.8.5. Gráfica de Optimización

La Figura 28 muestra la gráfica de cubos (medias ajustadas) para el porcentaje de recuperación Pb.

Figura 28

Gráfica de Optimización del % de recuperación de Pb, Ag



Nota: *Gráfico elaborado en MINITAB versión 22.*

La Figura 28 identifica las condiciones óptimas de los factores para maximizar las recuperaciones de plomo y plata de manera conjunta, resultando en una deseabilidad compuesta (D) de 0.9759. Los resultados indican que para alcanzar los máximos predichos de porcentaje recuperación Pb (81.56%) y % recuperación Ag (71.01%), se recomienda operar con Z-11 en 4.60 (valor alto), pH en 9.0 (valor alto) y % solidos en 20.0 (su nivel bajo). Esta configuración de factores representa la solución óptima dentro del espacio experimental estudiado, mostrando una clara influencia positiva de Z-11 y pH, y una influencia negativa de % solidos en las recuperaciones.

CONCLUSIONES

- El procedimiento de flotación Bulk aplicado al mineral polimetálico del proyecto PERUMING PANA permitió obtener un concentrado de Pb–Ag, confirmando la hipótesis central de que se lograría una mejora significativa en la recuperación de ambos metales. Según los resultados obtenidos a partir del diseño factorial 2^3 más tres puntos centrales, la prueba 4 representó la condición más favorable, alcanzando recuperaciones de 83.38% para Pb y 84.43% para Ag, obteniéndose así los mejores resultados.
- La gráfica de efectos principales para la recuperación de Pb permitió observar la tendencia clara de cada variable estudiada:
    - **Dosificación de colector (Z-11):** un incremento de 2.76 a 4.60 (cc) generó una mejora significativa en la recuperación, confirmando que, a mayor dosificación de colector, mayor recuperación de Pb**.**
    - **pH:** el aumento de pH de 7 a 9 también se tradujo en un incremento en la media de recuperación, donde se mejora la flotación y por ende la selectividad en la recuperación de Plomo.
    - **% de sólidos:** un aumento de 20% a 30% redujo la recuperación de Pb, lo cual se explica porque una pulpa más densa incrementa la viscosidad y la eficiencia en la aireación, dificulta la dispersión de burbujas y genera mayor colisión entre partículas, afectando la adhesión mineral–burbuja.

      En consecuencia, a menor % de sólidos, mayor recuperación de Pb**.**
- Finalmente, los resultados obtenidos permiten validar las hipótesis específicas planteadas: una adecuada dosificación de reactivos, un pH óptimo y un porcentaje de sólidos controlado contribuyen significativamente a mejorar la recuperación de plomo (Pb) en el proceso de flotación Bulk. Asimismo, la flotación Bulk resulta

viable para la recuperación de Pb, mientras que para la Ag será necesario realizar pruebas adicionales e incluir nuevas etapas de flotación (Cleaner) que permitan optimizar la recuperación y mejorar la ley de los concentrados.

RECOMENDACIONES

- Implementar **etapas adicionales de flotación**: Dado que en esta investigación se trabajó únicamente con una etapa de flotación Rougher, se recomienda incorporar posteriores etapas de Cleaner y Scavenger. Esto permitiría mejorar la calidad del concentrado (leyes de Pb y Ag), así como optimizar la recuperación global del proceso.

- Ampliar **el estudio de variables metalúrgicas**: Considerar en futuros trabajos otras variables no incluidas en el presente diseño experimental, tales como el tiempo de flotación, la granulometría de molienda y la mineralogía asociada. Estos factores podrían explicar en mayor medida la variabilidad observada en la recuperación de plata (Ag).

- Optimización **de reactivos**: Evaluar diferentes tipos y combinaciones de colectores, espumantes y depresores, con el fin de identificar reactivos más selectivos que permitan mejorar simultáneamente la recuperación y la ley de concentrado.

- Profundizar **en la recuperación de plata (Ag)**: Debido al bajo coeficiente de determinación obtenido para este metal, se sugiere realizar pruebas adicionales que integren caracterización mineralógica detallada, a fin de comprender mejor su comportamiento en el proceso de flotación.

- Validación **a escala piloto o semi-industrial**: Replicar las condiciones óptimas determinadas en este estudio en pruebas de mayor escala permitirá confirmar la reproducibilidad de los resultados y su aplicabilidad en la operación minera del proyecto **PERUMING PANA**

MATRIZ DE CONSISTENCIA: "TRATAMIENTO DE MINERALES POLIMETÁLICOS POR FLOTACIÓN BULK DEL PROYECTO MINERO PERUMING PANA - PUNO, LAMPA, PARATIA - 2024"

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE	METODOLOGIA
Problema General	**Objetivo General**	**Hipótesis General**	**Variable Dependiente**	
¿Cómo determinar, a nivel experimental, un proceso de flotación bulk que permita establecer condiciones operativas óptimas para la recuperación de plomo y plata (Pb–Ag) de los minerales polimetálicos del proyecto PERUMING PANA, y que constituya una base técnica para evaluar la viabilidad de instalar una planta de procesamiento en la zona de explotación?	Determinar, a nivel experimental, un proceso de flotación bulk que establezca condiciones operativas óptimas para la recuperación de plomo y plata (Pb–Ag) de los minerales polimetálicos del proyecto PERUMING PANA, constituyendo una base técnica para evaluar la viabilidad de instalar una planta de procesamiento en la zona de explotación.	Mediante la aplicación del proceso de flotación Bulk (Pb-Ag) a nivel experimental, se logra obtener recuperaciones aceptables de Plomo (Pb) y Plata (Ag), las cuales se estiman en un promedio de 80% para el Plomo y 70% para la Plata, superando el rendimiento metalúrgico de las vetas del yacimiento proyecto minero PERUMING PANA.	• Recuperación de Plomo - Plata (Pb - Ag)	**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** Experimental - Cuantitativa
Problema Específico	**Objetivo Especifico**	**Hipótesis Específica**	**Variable Independiente**	
¿Cuál es la dosificación adecuada del colector Z-11 para optimizar la recuperación de plomo y plata en la flotación bulk de los minerales del proyecto PERUMING PANA?	Determinar la dosificación adecuada del colector Z-11 para optimizar la recuperación de plomo y plata en la flotación bulk de los minerales del proyecto PERUMING PANA.	Una dosificación adecuada del colector Z-11, entre los valores de 2,76 ml a 4,60 ml, permite lograr una adecuada recuperación de plomo (Pb) y plata (Ag).	• Dosificación de Isopropílico de Sodio Z-11 (g/t) • pH (Grado de acidez del proceso) • Porcentaje de Sólidos (porcentaje)	**NIVEL DE INVESTIGACIÓN:** Descriptivo - Explicativo
¿Cuál es el rango de pH más favorable para el desarrollo del proceso de flotación bulk de Pb–Ag?	Establecer el rango de pH más favorable para el desarrollo del proceso de flotación bulk de Pb–Ag.	Mantener el pH en un rango de 8 a 9 favorece una adecuada recuperación de plomo (Pb) y plata (Ag) durante el proceso de flotación bulk.		**POBLACIÓN:** Minerales polimetálicos de Pb, Zn, Au y Ag, extraídos del Proyecto Minero PERUMING PANA- Puno, Lampa, Paratia. **MUESTRA:** 10 Kg
¿Qué porcentaje de sólidos permite obtener una recuperación eficiente de plomo y plata durante la flotación bulk?	Evaluar el porcentaje de sólidos que permita obtener una recuperación eficiente de plomo y plata durante la flotación bulk.	Un porcentaje de sólidos de 20% al 30% en la pulpa de flotación permite alcanzar una mayor recuperación de plomo (Pb) y plata (Ag) en las pruebas experimentales.		**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:** Diseño experimental factorial 2, con 2 niveles y 3 factores; 3 réplicas.

Nota: *Elaboración Propia*

BIBLIOGRAFÍA

- Anexos, Q. y. (s.f.). *Xantato Isopropilico de Sodio (Z11)*. Obtenido de https://www.quimicosyanexos.com/xantato-z11/
- Astucuri, V. (1994). *Introducción a la Flotación de Minerales.* Lima.
- Auqui Ochoa, A. A. (2021). *Influencia de las Variables en el Proceso de la Flotación de Minerales Polimetálicos para Mejorar la Productividad del Circuito de Zinc con Aplicación de los Diseños Experimentales en la Planta Concentradora "EL BROCAL".* Huancayo-Perú.
- Ballester, A., Verdeja, L., & Sancho, J. (s.f.). *Metalurgia Extractiva Fundamentos* (Vol. I). Madrid, España: Sintesis S.A.
- Boland. (2014). *TESIS DOCTORALES*. Obtenido de https://espace.library.uq.edu.au/](https://espace.library.uq.edu.au/
- De La Rosa Canales, J. M. (2013). *Flotación Selectiva de Minerales Sulfuros de Plomo-Zinc en Presencia de Reactivos Naturales del tipo Quebracho.* Tesis, México.
- Flores, J. K. (2018). *Recuperación de Oro en Concentrados de Cobre, estudio y adecuación de las variables de Flotación Flash.* Arequipa.
- Huallpa Antoniete, M. E. (2018). *Concentración por Flotación de Minerales Sulfurados: Plata, Plomo, Cobre, Zinc y Oro en Minerales Polimetálicos.* Lima-Perú.
- Mamani Leon, E. R. (2018). *Evaluación y Optimización del proceso de flotación de minerales polimetálicos de la Compañia Minera KOLPA S.A.* Arequipa-Perú.

- Minaja, P. A. (10 de Enero de 2018). *El Proceso de Flotación en Beneficio de los Minerales*. Obtenido de https://es.linkedin.com/pulse/el-proceso-de-flotacion-en-beneficio-los-minerales-meraz-vinaja-
- Mineria, Y. (s.f.). *yomineria*. Obtenido de https://yomineria.jimdofree.com/metalurgia-extractiva/concentracion-por-flotacion/
- Pardave, W. (2020). *Estudio Fisicoquímico de superficies de la flotación de minerales polimetálicos de la zona de California Santander.* Colombia.
- Pochteca. (s.f.). *ESPUMANTE MIBC*. Obtenido de https://chile.pochteca.net/wp-content/uploads/2021/06/HT_MIBC.pdf
- Quispe, E. (2024). *Optimización de la flotación Bulk para mejorar la recuperación de plata y plomo en la planta concentradora sociedad minera Andereal S.A.C.* Puno.
- Ruíz González, C. A. (2016). *Activación-depresión en la flotación selectiva de sulfuros de zinc-plomo en presencia de reactivos naturales (taninos quebracho).* Ciudad de México.
- S.A, D. D. (3 de Mayo de 2010). *Ficha Tecnica del Cianuro de Sodio*. Obtenido de https://www.dqisa.com/wp-content/uploads/2020/12/CIANURO-DE-SODIO.pdf
- S.A., D. d. (s.f.). *Ficha Tecnica Xantato Isopropilico de Sodio*. Obtenido de https://www.dqisa.com/wp-content/uploads/2020/12/XANTATO-ISOPROPILICO-DE-SODIO.pdf

- Sánchez Hernández, J. C., Recio S., R., & Sánchez L., S. (2022). Optimización del proceso de flotación Pb-Zn por medio de sub-proceso de pre- flotación de especies carbonosas. *XX Encuentro Sobre Procesamiento de Minerales*, 12.
- SOLVAY. (Septiembre de 2008). *AEROFLOAT 242 PROMOTER*. Obtenido de https://es.scribd.com/document/514581983/FICHA-TECNICA-AEROFLOAT-242
- Sutulov, A. (1963). *Flotación de Minerales.* Concepción.
- Valverde, J., Aramburú, V., Ortiz, J., Tiburcio, R., & Aguilar, S. (2024). Optimización de recuperación de Pb-Ag del proceso de flotación mediante la caracterización mineralógica de mineral polimetálico de la sierra norte del Perú. *Revista Industrial* , 13.
- Zanabria, N. (2020). *Fundamentos de Operación de Plantas Concentradoras.* INGECAP CONSULTORES.

ANEXOS

Anexo N° 1: Etapas de preparación y reducción del tamaño del mineral a trabajar - Lugar de trabajo UNSAAC

A) 	• Muestra del mineral del yacimiento minero PERUMING PANA - PUNO
B) 	• Reducción del tamaño del mineral en la Chancadora Cónica
C) 	• Tamizado del mineral en malla N° 12 – 1.7 mm.

D) 	• El mineral no pasante (Malla +12) se deja reservado para luego ser reducido de tamaño con ayuda de un mortero.
E) 	• Reducción de tamaño del mineral (Malla +12) con ayuda del mortero.
F) 	• Obteniendo así la reducción del mineral a un 1.7 mm.

Anexo N° 2: Etapas de molienda del mineral polimetálico - Lugar de trabajo UNSAAC

<table>
<tr>
<td>A)

</td>
<td>• Para poder realizar la etapa de molienda del mineral, pesamos 1000 gramos de mineral ya antes reducido.

• Solo se pesa la cantidad de 1000 gramos que es equivalente a 1 Kg, puesto que el molino de bolas que se va a usar para este proceso solo es para esa capacidad.</td>
</tr>
<tr>
<td>B)
 </td>
<td>• Se coloca el mineral al molino de bolas para su reducción y liberación.</td>
</tr>
</table>

C) 	• Se procede a realizar el trabajo en el molino de bolas. • El mineral será molido en un tiempo de 5 minutos, para luego ser tamizado en Malla 200.
D) 	• Después del tiempo de molienda, se retira el mineral del molino de bolas en una bandeja. • De los cuales se sacará una muestra representativa de 100 gr. para poder pasarlo a la Malla 200.
E) 	• Se pasa la muestra representativa (100 gr) para ser tamizada en la Malla 200. • El mineral a Malla -200 es el mineral que pasa por el tamiz, en cambio el mineral a Malla + 200 es el mineral que queda en el tamiz y que volverá a ser molido hasta que se reduzca al tamaño de la Malla -200.

F) 	• Mineral a Malla +200 • Peso: 63.8 gramos.
G) 	• El mineral a Malla +200 (no pasante) vuelve a ser ingresado al molino de bolas para su reducción de partículas. • Tiempo de molienda: 5 minutos.
H) 	• Después de la molienda, se vuelve a sacar una muestra representativa de 100 gramos para pasarla por la Malla 200.

I) 	• Se obtiene como mineral a Malla +200 (no pasante) una cantidad de 61.0 gramos de mineral. • Se realiza el procedimiento de liberación de la muestra una vez más, haciendo un total de 15 minutos para la liberación y reducción de partículas de la muestra al 100%. • Por lo tanto, se concluye que el tiempo de molienda para la liberación de las partículas es de 15 minutos.

Anexo N° 3: Procedimiento para la determinación de la gravedad especifica del mineral - Lugar de trabajo UNSAAC

A) 	• Materiales a utilizar para la determinación de la gravedad especifica del mineral polimetálico. • Peso del mineral: 20 gramos
B) 	• Cantidad de agua a utilizar: 50 ml para 3 probetas.
C) 	• Vertimos el mineral a la probeta donde ya se midió el agua.

D) 	• Se repite el mismo procedimiento para las tres probetas muestras, como se muestra en la imagen.
E) 	• Se da lectura a los volúmenes finales de cada probeta, obteniendo así: - Gravedad Especifica: 2.8571 para las tres probetas.

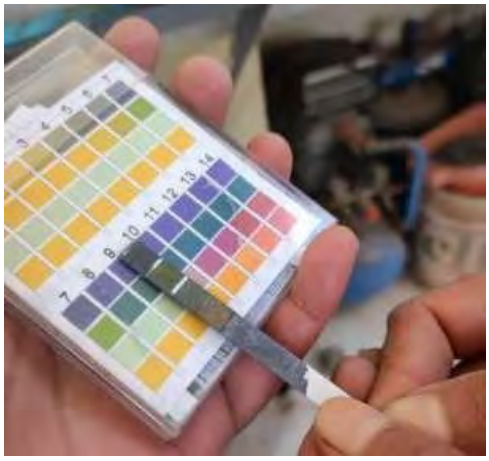
Anexo N° 4: Procedimiento para la preparación de mineral al % de sólidos y reactivos para pruebas metalúrgicas - Lugar de trabajo UNSAAC

A) 	• Para la iniciación de las pruebas de flotación y viendo que una de nuestras variables es el porcentaje de sólidos, se embolsará una determinada cantidad de mineral para cada porcentaje de sólidos. • Para el 20% = 459 gr de mineral • Para el 25% = 597 gr de mineral • Para el 30% = 745 gr de mineral
B) 	• Se realiza la preparación del reactivo Z-11 con una concentración de 1%.

C) 	• Así mismo se realiza la preparación de Sulfato de Zinc ($ZnSO_4$) con una concentración de 5%.
D) 	• También se realiza la preparación del reactivo Cianuro de Sodio (NaCN) con una concentración de 1%. • Así mismo para el reactivo MIBC y para el A-242 se utilizan de manera pura.

Anexo N° 5: Desarrollo del proceso de flotación Bulk - Lugar de trabajo UNSAAC

A) 	• Primeramente, se realiza la verificación del peso del mineral para la ejecución de la primera prueba.
B) 	• Se comienza con pesar la cal para la regularización del pH. • La cantidad de cal para cada prueba será diferente.
C) 	• Se procede a verter el mineral de la primera prueba, conjuntamente con la cantidad de agua a necesitar. • Así mismo, se empieza a dosificar el mineral con los reactivos y con la cal para controlar el pH.

D) 	• Se comienza a iniciar el proceso de mezcla, dando un tiempo de 2 minutos para que los reactivos puedan homogeneizarse con el mineral.
E) 	• Pasando los dos minutos, iniciamos midiendo el pH del mineral. • Con ayuda del papel tornasol, se verifica el pH del mineral de acuerdo a la cantidad de cal integrada a la muestra.

F) 	• Después de haber medido el pH del mineral de la primera prueba, se comienza a dar aireación al mineral para la formación de burbujas.
G) 	• Con ayuda de una espátula de madera, empezamos a empujar a la bandeja las burbujas que se están generando en el momento de la aireación.
H) 	• Es así que se obtienen el concentrado. • Lo sobrante (lo que queda en la celda de flotación) será nuestro relave.

I) 	• En cada prueba se realiza el mismo proceso de dosificación para cada muestra con diferentes cantidades. • Las burbujas de aire van mejorando y teniendo una forma más viscosa en cada prueba que se realiza.

Tabla 40 Cuadro de dosificación de Reactivos

			Porcentaje de solidos		Variables Evaluadas			Variables Constantes			
N° PRUEBA	**DOSIS Z-11**	**pH**		**Y**	**Z-11**	**CAL (gr)**	**AGUA (cc)**	**ZnSO4**	**NaCN**	**A-242**	**MIBC (gotas)**
PRUEBA 1	-	-	-	75	2.76	0.33	1839.23	4.6	0.69	1.15	4.5
PRUEBA 2	+	-	-	85	4.6	0.33	1839.23	4.6	0.69	1.15	4.5
PRUEBA 3	-	+	-	81	2.76	0.4	1839.23	4.6	0.69	1.15	4.5
PRUEBA 4	+	+	-	92	4.6	0.4	1839.23	4.6	0.69	1.15	4.5
PRUEBA 5	-	-	+	73	2.76	0.3	1739.36	7.45	1.12	1.86	6
PRUEBA 6	+	-	+	79	4.6	0.3	1739.36	7.45	1.12	1.86	6
PRUEBA 7	-	+	+	77	2.76	0.4	1739.36	7.45	1.12	1.86	6
PRUEBA 8	+	+	+	90	4.6	0.4	1739.36	7.45	1.12	1.86	6
PRUEBA 9	0	0	0	84	3.58	0.4	1721.33	5.97	0.9	1.49	5.1
PRUEBA 10	0	0	0	83.5	3.58	0.4	1721.33	5.97	0.9	1.49	5.1
PRUEBA 11	0	0	0	83.8	3.58	0.4	1721.33	5.97	0.9	1.49	5.1

Nota: *Adaptación Propia*