



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Recuperación de cobre con contenido de plata de
minerales sulfurados mediante el proceso de flotación en
Huaraz – Ancash**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Christian Marlon SANTAMARIA URBINA

ASESOR

Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Santamaria, C. (2026). *Recuperación de cobre con contenido de plata de minerales sulfurados mediante el proceso de flotación en Huaraz – Ancash*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	CHRISTIAN MARLON SANTAMARIA URBINA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70333507
URL de ORCID	
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	DANIEL FLORENCIO LOVERA DAVILA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10647742
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	JOSE LUIS VIDARTE MERIZALDE
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	07397539
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.17. Flotación de Minerales
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Huaraz
Año o rango de años en que se realizó la investigación	ABRIL 2024- MAYO 2025
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



«Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO**

En el salon de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 15, del mes de junio de 2026 siendo las 10:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO Lovera Dávila

(PRESIDENTE)

Dr. LUIS AMÉRICO Rivera Del Valle

(MIEMBRO)

Ing. JOSE LUIS Vidarte Merizalde

(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: **«RECUPERACIÓN DE COBRE CON CONTENIDO DE PLATA DE MINERALES SULFURADOS MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN HUARAZ- ANCASH»** presentado por Don: CHRISTIAN MARLON SANTAMARIA URBINA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

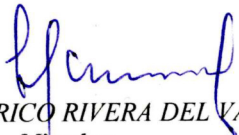
.....Quince (15).....Aprobado.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Christian Marlon Santamaria Urbina**.

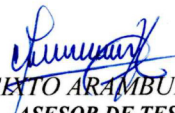
Siendo las **11:00** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 15 de junio de 2026


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Dr. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Miembro


Ing. JOSE LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SEXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE

SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado mediante Resolución Decanal N.º000059-2024-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es "RECUPERACIÓN DE COBRE CON CONTENIDO DE PLATA DE MINERALES SULFURADOS MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN HUARAZ - ANCASH", presentado por el bachiller **CHRISTIAN MARLON SANTAMARIA URBINA** para optar el título profesional del Ingeniero Metalúrgico, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 15% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional del Ingeniero Metalúrgico.

Lima, 26 de junio de 2026

Firma del Asesor: _____

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURU ROJAS

DNI: 08608364

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTOS.....	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
NOMENCLATURA.....	9
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE FIGURAS	13
CAPÍTULO I: Introducción	15
1.1. Situación problemática	15
1.2. Formulación del problema.....	16
1.2.1. Problema general	17
1.2.2. Problemas específicos.....	17
1.3. Justificación	17
1.3.1. Justificación teórica	17
1.3.2. Justificación práctica	18
1.3.3. Justificación económica.....	19
1.4. Objetivos.....	20
1.4.1. Objetivo general	20
1.4.2. Objetivos específicos.....	20
1.5. Hipótesis de investigación	21
1.5.1. Hipótesis general	21
1.5.2. Hipótesis específicas.....	21

CAPÍTULO II: Marco Teórico.....	22
3.1. Antecedentes de estudio	22
3.1.1. Antecedentes Internacionales	22
3.1.2. Antecedentes nacionales.....	25
3.2. Bases teóricas	29
3.2.1. Flotación de minerales.....	29
CAPÍTULO III: Metodología.....	45
3.1. Tipo y diseño de investigación	45
3.2. Variables de investigación.....	45
3.2.1. Variable independiente	45
3.2.2. Variable dependiente	45
3.3. Operacionalización de variables.....	46
3.3.1. Matriz de operacionalización de variables	47
3.4. Unidad de análisis.....	49
3.5. Población y muestra	49
3.5.1. Población	49
3.5.2. Muestra	49
3.5.3. Selección de la muestra	50
3.5.4. Ubicación geológica del área de estudio	50
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	52
3.6.1. Técnicas de recolección de datos.....	52
3.6.2. Análisis e interpretación de la información.....	53
CAPÍTULO IV: Resultados y discusión	54
4.1. Presentación de resultados.....	54
4.1.1. Análisis mineralógico del mineral sobre una sección pulida	

4.1.2.	Análisis químico del mineral de cabeza	62
4.1.3.	Resultados de flotación cobre-plata.....	62
4.1.4.	Análisis de malla valorada.....	64
4.1.5.	Desarrollo del diseño factorial.....	66
4.2.	Análisis, interpretación y discusión de resultados	77
4.2.1.	Análisis mineralógico	77
4.2.2.	Análisis químico del mineral de cabeza	78
4.2.3.	Resultados de flotación de cobre-plata.....	79
4.2.4.	Análisis estadístico (Diseño factorial y ANOVA)	79
4.3.	Prueba/ Comprobación de hipótesis	81
4.3.1.	Hipótesis para la recuperación de cobre	81
4.3.2.	Hipótesis para la recuperación de plata	82
4.3.3.	Evaluación técnico-económica del proceso.....	84
CONCLUSIONES.....		85
RECOMENDACIONES		87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		89
Anexos.....		95

DEDICATORIA

A mis padres,

Por su amor incondicional, apoyo inquebrantable y por creer en mí desde el primer momento. Gracias por enseñarme el valor del trabajo duro, la perseverancia y la honestidad. Este logro es tan suyo como mío.

A mis hermanos,

Por su amistad, compañerismo y por estar siempre ahí para mí, por confiar en mis capacidades siempre, incluso cuando yo mismo dudaba de ellas. Gracias por sus risas, sus consejos y por compartir conmigo este camino.

A mis profesores,

Por su guía, paciencia y por transmitirme su pasión por el conocimiento. Gracias por inspirarme a ser mejor estudiante y persona.

A todos ellos,

Dedico con extensa gratitud este trabajo, fruto de su amor, apoyo y enseñanzas.

Con cariño y reconocimiento eterno,

Christian Santamaria Urbina

AGRADECIMIENTOS

Me faltarían palabras para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial a mis Padres que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo más que suficiente para no decaer cuando todo parecía muy complicado e imposible para salir adelante a pesar de las dificultades se pudo salir adelante y lograr el objetivo anhelado que tanto quise.

Asimismo, agradezco infinitamente a mis hermanos que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy.

Y en especial, al **Dr. Vidal Sixto Aramburú**, por su guía, compromiso y valiosas orientaciones durante el desarrollo de esta tesis. Su apoyo y experiencia fueron fundamentales para culminar este trabajo.

A todos, gracias por formar parte de este logro.

RESUMEN

La presente tesis evaluó el proceso de flotación selectiva cobre-plata en un mineral complejo proveniente de la zona de Huaraz. El estudio se centró en determinar cómo influyen la granulometría del mineral y la dosificación del colector xantato isopropílico de sodio (Z-11) en la recuperación de los valores metálicos, específicamente cobre y plata.

Inicialmente, se realizó un análisis mineralógico sobre una muestra representativa utilizando microscopía óptica de luz reflejada en sección pulida. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis químico del mineral de cabeza, obteniéndose leyes promedio de 1.85 % Cu y 1.57 oz/Tc de Ag. En la etapa experimental, se aplicó un diseño factorial 2^2 con dos niveles (granulometría: 65.57 % y 73.67 % -200 malla; Z-11: 30 y 50 g/TM), realizando ocho pruebas metalúrgicas. Los ensayos se ejecutaron en un sistema de flotación convencional, manteniendo constantes el pH (7), tipo de espumante (MIBC) y tiempo de flotación (8 minutos).

Los resultados más destacados mostraron que la máxima recuperación de cobre (99.49 %) y plata (93.00 %) se alcanzó con una granulometría del 73.67 % -200 malla y una dosificación de Z-11 de 50 g/TM. El análisis de varianza (ANOVA) reveló que ambas variables independientes tienen una influencia significativa sobre la recuperación, siendo la granulometría la de mayor peso (53.06 %). La interacción entre factores fue estadísticamente no significativa.

Finalmente, se elaboraron modelos de regresión en unidades no codificadas que permiten predecir la recuperación de cobre y plata en función de las variables estudiadas, con un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 88.81 %.

PALABRA CLAVE: Flotación, granulometría, xantato isopropílico de sodio.

ABSTRACT

The present thesis evaluated the selective copper–silver flotation process of a complex mineral from the Huaraz area. The study focused on determining how mineral particle size (grind size) and the dosage of the sodium isopropyl xanthate collector (Z-11) influence the recovery of metallic values, specifically copper and silver.

A representative ore sample was first analyzed using reflected light optical microscopy on polished sections. Subsequently, chemical analysis of the head ore showed average grades of 1.85% Cu and 1.57 oz/Ton Ag. A 2² factorial design was applied with two levels for each variable (grind size: 65.57% and 73.67% passing -200 mesh; Z-11 dosage: 30 and 50 g/MT), conducting eight flotation tests under fixed conditions (pH 7, MIBC frother, 8 minutes flotation time).

The highest recovery of copper (99.49%) and silver (93.00%) was achieved with a grind size of 73.67% -200 mesh and 50 g/MT of Z-11. ANOVA results showed that both variables significantly influence metal recovery, with grind size having the greatest impact (53.06%). The interaction between the two factors was not statistically significant.

Regression equations in uncoded units were developed to model copper and silver recovery, with an adjusted R-squared value of 88.81%.

KEYWORD: Flotation, particle size distribution, sodium isopropyl xanthate.

NOMENCLATURA

Oz/TC	Onza por tonelada corta.
ozt	Onzas troy.
mm	Milímetro.
L/S	Relación líquido-sólido.
ml	Mililitro.
m	Metro.
μm	Una micra o micrómetro.
Kg/m^3	Kilogramos por metro cúbico.
pH	Variación de Hidrógeno.
US\$	dólares americanos.
hr	Horas.
g	Gramo.
TM	Toneladas métricas.
g/TM	Gramo por tonelada métrica.
mg/l	Miligramo por litro.
min	Minuto.
RPM	Revoluciones por minuto.
S	Desviación estándar de una población.
R-cuad	Coefficiente de determinación.
SC Ajust	La suma de cuadrados ajustada de un término.
SC Sec	Las sumas secuenciales de los cuadrados.
MC Ajust	Los cuadrados medios ajustados.
Valor F	Distribución continua de muestreo.
Valor p	Medida de la evidencia en sus datos.
GL	Total de grados de libertad.
PRESS	Suma de los cuadrados de error de predicción.
AICc	Criterio de información de Akaike corregido.
BIC	Criterio de información bayesiano.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	39
Reactivos para la flotación de cobre-plata.....	39
Tabla 2	40
Espumante utilizados en los procesos de flotación de cobre (Cu) - plata (Ag).....	40
Tabla 3 Matriz de operacionalización de variables	47
Tabla 4	55
Minerales que contiene la muestra representativa (malla -325).....	55
Tabla 5	58
Volumen y grados de liberación de los minerales	58
Tabla 6	59
Los tipos de enlaces y su respectiva posibilidad de liberación.....	59
Tabla 7	62
Composición química del mineral de cabeza	62
Tabla 8	63
Resumen del análisis granulométrico (molienda del mineral de cabeza).....	63
Tabla 9	64
Condiciones operativas para las pruebas de flotación	64
Tabla 10	65
Distribución inferida de valores metálicos por fracción granulométrica	65
Tabla 11	67
Valores mínimos y máximos de las variables para la flotación de cobre-plata.....	67
Tabla 12	67
Diseño factorial elaborado para desarrollar las pruebas de flotación de cobre-plata	67
Tabla 13	69
Balance metalúrgico. Primera prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una	

granulometría de 65.57% - 200 malla	69
Tabla 14	69
Balance metalúrgico. Segunda prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla	69
Tabla 15	70
Balance metalúrgico. Tercera prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 65.57% - 200 malla	70
Tabla 16	70
Balance metalúrgico. Cuarta prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla	70
Tabla 17	71
Balance metalúrgico. Quinta prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una granulometría de 65.57% - 200 malla	71
Tabla 18	71
Balance metalúrgico. Sexta prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla	71
Tabla 19	72
Balance metalúrgico. Séptima prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 65.57% - 200 malla	72
Tabla 20	72
Balance metalúrgico. Octava prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla	72
Tabla 21	74
Análisis de varianza en la recuperación de cobre-plata en el proceso de flotación.....	74
Tabla 22	74
Resumen del diseño factorial-pruebas de flotación cobre-plata por el proceso de flotación	

.....	74
Tabla 23	81
Resultados del ANOVA para el cobre.....	81
Tabla 24	99
Matriz de consistencia	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1

Representación esquemática de la celda y el proceso de flotación 31

Figura 2

Mapa geológico del área de estudio 51

Figura 3

Mineral proveniente de Huaraz 54

Figura 4

Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs); adyacente están las partículas libres de gangas (GGs). 200X 60

Figura 5

Partículas libres de calcopirita (cp), de electrum (el) y de gangas (GGs); partícula entrelazada de galena (gn) con argentita (agt). 200X. 61

Figura 6

Partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la tetrahedrita (td) y electrum (el). 500X 61

Figura 7

Curva de moliendabilidad del mineral de cabeza 63

Figura 8

Curva de malla valorada (interpretativa) 66

Figura 9

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados 75

Figura 10

Gráfica normal de efectos estandarizados 75

Figura 11

GRÁFICO 3D (ANOVA / Superficie de respuesta para la recuperación de cobre en función de la granulometría y la dosificación del colector Z-11) 76

Figura 12

Gráfica de efectos normales estandarizados 96

Figura 13

Gráfica de probabilidad normal 96

Figura 14

Fotografía de la flotación cobre-plata 97

Figura 15

Espumas de la flotación que arrastran el concentrado de Cu-Ag 97

CAPÍTULO I: Introducción

1.1. Situación problemática

La región de Áncash, específicamente en la provincia de Huaraz, es reconocida por su riqueza en minerales sulfurados, entre los que destacan el cobre y la plata. Sin embargo, uno de los principales desafíos que enfrenta la industria minera en esta zona es la recuperación eficiente de estos metales, especialmente cuando se encuentran combinados en un mismo mineral. La presencia de sulfuros complica el proceso de separación y recuperación metalúrgica, debido a la complejidad mineralógica y a las interferencias que ocurren durante el proceso de flotación.

El proceso de flotación, técnica ampliamente utilizada para la concentración de minerales sulfurados, presenta limitaciones cuando se trata de recuperar simultáneamente cobre y plata en forma eficiente, especialmente cuando esta última se encuentra en baja ley o asociada a minerales complejos como la pirita o la arsenopirita (Wills & Finch, 2016). En el caso de la minería en Huaraz, se ha identificado que los minerales presentan características que reducen la recuperación metalúrgica, afectando no solo el rendimiento económico, sino también la sostenibilidad del proceso extractivo.

A pesar de la importancia de la flotación en la recuperación de cobre y plata, aún existen brechas técnicas significativas relacionadas con la selección adecuada de reactivos, condiciones de pH, tiempos de flotación, entre otros factores que influyen directamente en la eficiencia del proceso (Herrera-Urbina, 2020). En este contexto, la carencia de estudios específicos aplicados a los minerales sulfurados de la región de Huaraz impide optimizar el aprovechamiento de estos recursos, generando un desaprovechamiento del potencial económico de los minerales presentes.

Además, la creciente exigencia por parte del Estado y del mercado internacional de prácticas más eficientes y ambientalmente responsables obliga a las operaciones

mineras a mejorar sus procesos metalúrgicos (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2022). Por ello, es indispensable desarrollar investigaciones que permitan mejorar los índices de recuperación de cobre con contenido de plata mediante técnicas adecuadas y adaptadas a las condiciones particulares de los minerales de la zona.

En consecuencia, se hace necesario estudiar y optimizar el proceso de flotación aplicado a los minerales sulfurados de la región de Huaraz – Áncash, con el objetivo de mejorar la recuperación de cobre y plata, permitiendo una explotación más eficiente, rentable y sostenible de los recursos minerales disponibles.

1.2. Formulación del problema

En la zona de Huaraz – Áncash, la recuperación metalúrgica de cobre con contenido de plata proveniente de minerales sulfurados presenta valores promedio cercanos al 80 %, los cuales se encuentran por debajo del nivel óptimo esperado (>85 %). Esta situación genera pérdidas económicas y reduce la eficiencia del aprovechamiento del recurso mineral.

La baja recuperación está asociada a factores como la complejidad mineralógica del yacimiento, la liberación incompleta del mineral valioso debido a una granulometría de molienda no optimizada y la dosificación inadecuada de reactivos colectores en el proceso de flotación.

Asimismo, existe limitada información técnica específica para las condiciones mineralógicas de Huaraz – Áncash respecto a la interacción entre granulometría de molienda y dosificación del colector Z-11 en la recuperación conjunta de cobre y plata.

En este contexto, se plantea la necesidad de evaluar y optimizar los parámetros operativos del proceso de flotación, particularmente la granulometría de molienda y la

dosificación del reactivo colector Z-11, con el fin de incrementar la recuperación metalúrgica de cobre con contenido de plata por encima del 85 %.

1.2.1. Problema general

- ¿Cómo influyen la granulometría de molienda y la dosificación del reactivo colector Z-11 en la recuperación metalúrgica de cobre con contenido de plata, a fin de incrementar la recuperación del 80 % actual a valores superiores al 85 %, mediante el proceso de flotación de minerales sulfurados en Huaraz – Áncash?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿De qué manera la granulometría de molienda (P_{80}) influye en la recuperación de cobre con contenido de plata en el proceso de flotación?
- ¿Cómo afecta la variación del consumo del reactivo colector Z-11 (g/t) en la recuperación de cobre con contenido de plata en el proceso de flotación?
- ¿De qué manera los resultados de las pruebas metalúrgica de flotación a nivel de laboratorio permiten la recuperación de cobre con contenido de plata?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación teórica

Teóricamente, la flotación es un proceso de separación que utiliza las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de las superficies minerales para separar los minerales valiosos de la ganga. Los conceptos fundamentales incluyen:

La flotación se basa en la termodinámica de la formación de una película líquida alrededor de las partículas minerales, así como en la cinética de las reacciones que tienen

lugar en la superficie de estas partículas. La teoría de la flotación abarca el estudio de las fuerzas de adhesión y cohesión entre las partículas minerales y las burbujas de aire.

Los colectores, espumantes y modificadores juegan un papel crucial en la selectividad y eficiencia del proceso de flotación. La teoría detrás de la adsorción de colectores en la superficie de los minerales sulfurados explica cómo se mejora la hidrofobicidad de estos minerales, facilitando su separación.

Los modelos teóricos de interacción mineral-burbuja explican cómo las burbujas de aire se adhieren a las partículas minerales, permitiendo su ascenso a la superficie para formar una espuma rica en mineral.

1.3.2. Justificación práctica

Desde un punto de vista práctico, la recuperación de cobre y plata mediante flotación tiene varias implicaciones importantes:

La minería eficiente y sostenible requiere métodos que maximicen la recuperación de minerales valiosos a partir de los recursos existentes. El proceso de flotación permite la extracción eficiente de cobre y plata, reduciendo el desperdicio de recursos y mejorando la rentabilidad de las operaciones mineras.

La mejora en las técnicas de flotación puede llevar a un aumento significativo en la recuperación de cobre y plata, lo que se traduce en mayores ingresos para las compañías mineras. Además, la flotación permite procesar minerales de menor ley de manera rentable, lo que es crucial en un contexto de agotamiento de recursos de alta ley.

Procesos eficientes de flotación pueden minimizar el uso de reactivos químicos y reducir la generación de residuos sólidos y líquidos, contribuyendo a prácticas mineras más sostenibles y responsables desde el punto de vista ambiental.

1.3.3. Justificación económica

Desde el punto de vista económico, la presente investigación se justifica porque aborda la optimización del consumo de reactivos químicos en el proceso de flotación de minerales sulfurados de cobre con contenido de plata, específicamente del colector xantato isopropílico de sodio (Z-11), el cual representa un componente significativo dentro de los costos operativos de una planta concentradora. La reducción en el uso de este reactivo tiene un impacto directo en la disminución del costo total de operación del proceso metalúrgico.

La reducción del consumo del colector Z-11 se traduce en una disminución directa de los costos asociados a la adquisición, almacenamiento y manejo de reactivos, generando ahorros económicos que pueden ser significativos cuando el proceso se aplica a escala industrial. En operaciones de mediana y gran escala, incluso pequeñas reducciones en la dosificación de reactivos representan un impacto económico positivo acumulativo a lo largo del tiempo.

La aplicación de las condiciones operativas optimizadas determinadas en esta investigación contribuye a mejorar la rentabilidad del tratamiento de minerales sulfurados de cobre-plata, fortaleciendo la competitividad económica de las operaciones minero-metalúrgicas. De este modo, el estudio ofrece una alternativa económicamente viable para la optimización de procesos de flotación en la zona de Huaraz – Áncash, con potencial de replicabilidad en yacimientos de características mineralógicas similares.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Recuperar cobre con contenido de plata a partir de minerales sulfurados evaluando la granulometría y el consumo del reactivo colector Z-11 mediante el proceso de flotación en Huaraz- Ancash.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar el efecto de la variación de la granulometría (P80) en la respuesta metalúrgica para identificar el tamaño de liberación óptimo.
- Cuantificar la incidencia del consumo del colector Z-11 en la recuperación de Cu y Ag mediante un diseño experimental factorial.
- Optimizar los parámetros operacionales de granulometría y dosificación de colector para maximizar la recuperación metalúrgica por encima del 85%.

1.5. Hipótesis de investigación

1.5.1. Hipótesis general

- La variación de la granulometría de molienda (P80) y la dosificación del reactivo colector Z-11 influye significativamente en la recuperación metalúrgica de cobre con contenido de plata, permitiendo incrementarla de 80 % a valores superiores al 85 % en el proceso de flotación de minerales sulfurados de Huaraz – Áncash.

1.5.2. Hipótesis específicas

- La reducción de la granulometría de molienda hasta alcanzar un tamaño óptimo de liberación (≈ 80 % de liberación) incrementa significativamente la recuperación de cobre con contenido de plata en el proceso de flotación.
- El incremento controlado de la dosificación del reactivo colector Z-11 (g/t) mejora significativamente la recuperación de cobre con contenido de plata en el proceso de flotación.
- La optimización de las condiciones operativas en flotación maximiza la recuperación de minerales sulfurados.

CAPÍTULO II: Marco Teórico

3.1. Antecedentes de estudio

3.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Peña (2023) con el estudio que lleva por nombre “Rescate de oro puro y vinculado con la pirita de relaves de la empresa de minería “El Roble” a través de la técnica de alternancia teniendo como objetivo rescatar de los relaves de las represas 1 y la 4 de la empresa de minería El Roble, las piritas que llevan oro y oro puro; a través del método de alternancia en el laboratorio, proponiéndose el prosperado en la planta.

Calle (2023) en su estudio realizado en Ecuador con el nombre de “Adquisición de sulfuro de zinc del mineral del cual se extrajeron una variedad de metales por medio de la alternancia electiva en la explotación minera Cristina David, del Pasaje El Oro” el cual tiene por objetivo identificar a través de la técnica de alternancia electiva lograr una más elevada acumulación en la variedad de prácticas para obtener esfalerita y franklinita. Para ello se empleó la metodología cuantitativa de tipo experimental. Como resultado de los experimentos de flotación selectiva con el rescate del 1er. Experimento en el que fue elevado el rescate del sulfuro de zinc, del mismo modo, el rescate del 2do. Experimento, en su fase 1 el rescate selectivo de los sulfuros ferrosos dio como resultado 58%, entre tanto, en la fase 2, el rescate de óxido de zinc resultó 49% calificando el protocolo de la alternancia electiva como exitoso. Lo que permite concluir que se necesita cambiar criterios químicos, encontrando opciones que no sean nocivas para el medio ambiente, con el propósito de obtener mayores ganancias económicas que no generen altos efectos el ámbito social y el ambiental.

Salvo (2022) en su estudio realizado en Chile, el cual se titula “productividad de filtración por membranas con el fin de tratar agua contenidas en cubeta de estanques de

relaves de la explotación minera del cobre en Chile” ” el cual tiene como objetivo general el de valorar un método para tratar aguas por medio de filtración por membranas, por comprobaciones de una planta experimental, haciendo que circule agua rescata de un par de estanques de relaves de la minera Codelco (Tranque Talabre y Ovejería) con el fin de obtener modelos de excelencia del agua la cual se pretende volver a usar en el ámbito de la agricultura. La metodología empleada es de tipo cuantitativa de tipo descriptiva de campo respecto a la productividad de del protocolo planteado, NF, para inferir en la efectividad del método para eliminar los iones del agua, sin embargo, no es suficiente para reusarse en el ámbito de la agricultura, la cancelación de sulfatos en Talabre y Ovejería, además, obtuvo bajo resultado (60 a 70% de desaprobación y de 90% de manera respectiva), en Talabre el arsénico, aunque logra ubicarse por encima del 95% de desaprobación, no baja la acumulación del nivel establecido en la normativa.

Figuerola et al., (2024) en su estudio titulado “Análisis de protocolos en el rescate de oro y plata de lixiviado por medio del empleo de una electrolítica celda”. Tuvieron como objetivo general mejorar el rescate de plata y oro de minerales oxidados o sulfurosos. Tradicionalmente, este proceso se realiza mediante la disolución de los metales valiosos, obteniendo una solución rica en estos metales, conocida como lixiviado. Posteriormente, la plata o el oro se extraen de esta solución usando métodos regularizados a escala grande los cuales emplean polvo de zinc y carbón activado. Este proceso, denominado desorción, es complejo y requiere áreas, procedimientos y materiales especiales, lo que lo hace lento y complicado. Para optimizar el rescate de estos metales de alto valor, se propuso emplear para electrodeposición una electroquímica celda. Se prepararon los equipos y materiales necesarios, incluyendo una electrolítica celda de material plástico, un ánodo de cobre en alambre y un cátodo rectangular de lámina en aluminio. Los dos electrodos se sumergieron en la superior solución de lixiviado, la cual

tiene plata y oro en la forma de ion. Se utilizó cianuro sódico (NaCN-) tal cual electrolito, y la celda se alimentó con un flujo eléctrico de $3.6 \text{ V} \sim 600 \text{ mA}$, suministrada por un cargador con flujos de ingreso de $120 \text{ V} \sim 60 \text{ Hz}$ o 0.1 A , permitiendo así la deposición de los metales valiosos en el ánodo. Se llevaron a cabo una variedad de corridas de electrodeposición en cuanto al tipo experimental para optimizar el procedimiento de recuperación de metales valiosos. La metodología aplicada mostró que la electrodeposición es un proceso efectivo para recuperar oro y plata del lixiviado, ofreciendo una alternativa más eficiente y menos complicada que los métodos tradicionales de flotación y disolución con cianuro de sodio.

Quispe (2023) en su estudio titulado “Rescate de minerales de cobalto y de cobre por medio del protocolo de alternancia desde el mineral que procede de la Empresa Minera San Luis de Chulchucani” tuvo como propósito general optimizar la recuperación de estos minerales valiosos. Inicialmente, fue realizada una caracterización mineralógica, química y física del mineral. Basándose en estos resultados, se diseñaron pruebas experimentales de flotación, que incluyeron una etapa previa de sulfurización. El estudio se estructuró en un par de etapas. En estas fases, fue evaluado el efecto de variantes independientes dosis de Na_2S , el lapso para acondicionarse con Na_2S , pH de alternancia y la dosis del recolector AERO 7310. Las variantes que respondieron se trataron del rescate de aspectos de valor y la magnitud de la riqueza. A fin de evaluar el impacto en todos los factores, se empleó la técnica de diseño factorial 2^k . En la primera fase, se consideraron cuatro factores con dos niveles cada uno, y en la segunda fase, tres factores con dos niveles cada uno, utilizando el programa MINITAB 18, comúnmente usado para la optimización de procesos. Los resultados indicaron que la combinación óptima de las variables condujo a mejorar significativamente en el rescate del cobre y del cobalto. En conclusión, la metodología aplicada demostró ser eficaz para optimizar la recuperación

de estos minerales valiosos, proporcionando basamentos sólidos a las investigaciones venideras y aplicaciones en el rubro minero.

3.1.2. *Antecedentes nacionales*

Villalta (2022) en su estudio titulado “estudio del perfeccionamiento de elementos y criterios los cuales impactan la alternancia de molibdenita en planta de molibdeno en acumuladora Cuajone” que tiene como objetivo el de Analizar la optimización de parámetros operacionales, que influyan en planta de desunión del molibdeno y el cobre, para una eficiente recuperación y grado de molibdenita. Para dar cumplimiento se tomó como base metodológica la de una investigación cuantitativa de tipo experimental-descriptiva, de igual forma la muestra de este estudio es representativa con relación a la planta de molibdeno, registrada en los reportes oficiales de Concentradora Cuajone de 2022 por guardia en una base datos histórica. Los instrumentos y métodos para usarse a fin de recopilar información cuantitativa en planta de molibdeno, será de manera estadística con fuente secundaria de datos operativos, usando la metodología RSM superficie respuesta. Dentro de los resultados más destacados se tiene que al introducir aire en las celdas de alternancia en planta de separación de cobre-molibdeno, se verá afectado directamente en las etapas de rougher y las tres primeras limpiezas, las cuales trabajan con presiones de 3 a 5 psi de nitrógeno como gas inerte. En resumen, al utilizar aire de planta en lugar de gas nitrógeno en las etapas de rougher y en las primeras, segundas y terceras limpiezas, se prevé un aumento en el consumo de reactivos como el NaSH. La presencia de oxígeno disuelto en la pulpa puede provocar la superficial oxidación de la molibdenita, pero la añadidura del petróleo se considera útil para mantener una recuperación adecuada de la molibdenita y evitar una caída excesiva en la eficiencia del proceso.

Sacsi (2022) en su tesis de grado que lleva por nombre “medición del recorrido de remolienda a fin de optimizar la alternancia cleaner en la empresa de minería Constancia” teniendo por objetivo el de medir y perfeccionar el protocolo de remolienda en planta de acumulado en unidad la empresa de minería Constancia. Es por ello que fue propuesto un método con visión cuantitativa, del tipo tecnológico y aplicativo, contando con una evaluación de la planta específicamente de los acumulados Rougher, con estudio microscópico y químico. Para concluir que se puede perfeccionar el rescate del cobre, usando el molino Isamill en el protocolo de remolienda, del modo en que es mostrado en las micrográficas fotografías, en las cuales puede observarse una dimensión pequeña de partículas y el material tóxico con baja presencia vinculado al mineral del cobre. Adicional, en la resulta microscópica de P80 de remolienda puede observarse que la dimensión de partículas se ubica entre 30 y 55 micras, en una media de 33 micras.

Asillo (2022) en su trabajo de investigación que lleva como nombre el de “medición de un recorrido de rescate de zinc y de plomo por medio de gravimetría y alternancia” teniendo además como objetivo el de analizar y evaluar el tratamiento de minerales polimetálicos de plomo y zinc de un circuito de recuperación mediante gravimetría y flotación. Para ello se siguió como argumento metodológico el de una investigación cuantitativa de tipo experimental-descriptiva. Como medio de recolección de datos se identificaron el conducta mineral y adecuación metalúrgica de gravimetría y alternancia, por medio de comprobaciones experimentales realizadas, circunstancias laborales y resulta obtenida, se prosigue con la presentación de gráficas las cuales harán más fácil el entendimiento de la temática y para finalizar la eficacia en la desunión. Como resultado se encontró en espiral con una corriente de 65 L/minuto y con una proporción de sólidos de 30% con 100% pasante entre la malla 65 Tyler; entre tanto en la alternancia se realizó un trabajo con 35% de sólidos y con 80% pasante entre la malla 150 Tyler. Para

lo cual se obtuvo un rescate en su totalidad de 85% de Pb y 82.5% de Zn. Dentro de las conclusiones se destaca que los % de rescate del plomo y del zinc resultaron los que se esperaban, por tanto, influye grandemente y en especial en la granulometría, pH, los reactores que se usaron. A lo cual se adicionan las acciones mezcladas de gravimetría que permitió alcanzar la valoración de acumulados adaptados a la comercialización. Para dar cumplimiento a este objetivo se emplea la metodología de una investigación cuantitativa experimental. Dentro de las conclusiones se destaca que no fue posible establecer que en el protocolo de molienda hubiera liberación oro, sin embargo, sí fue posible establecer que el oro se rescató en el protocolo de alternancia, pues, las comprobaciones de espectroscopia para absorción efectuadas a los acumulados lo demostraron, es por ello que se recomienda llevar a cabo una comprobación microscópica SEM con estudio EDS a los acumulados a fin de que se observe si ocurre liberación en el protocolo de la molienda.

Loyola (2022) en su estudio titulado “Conducta de la sulfurización de los complejos minerales de la plata-plomo a fin de rescatarlo adecuadamente por alternancia en Empresa de Minería Raura, 2021”. El estudio se enfocó en dar beneficio a un oxidado mineral del plomo de ley baja con contenido de plata. Fueron analizadas las conductas de la sulfuración de diversos minerales de plata-plomo- a distintas valoraciones de pH mediante la técnica de estudio de etapa química y fueron investigadas las interrelaciones con distintos recolectores. Fue desarrollado un protocolo en el laboratorio eficiente y se realizaron comprobaciones de recorrido cerrado en condiciones de la industria. Los resultados indicaron que la dificultad de sulfuración de los minerales de la plata y del plomo seguía el orden: $(\text{PbFe}_6(\text{OH})_{12}\text{SO}_4)_4 < \text{PbCO}_3 < \text{PbSO}_4 < \text{Pb}_5(\text{P/As/VO}_4)_3\text{Cl}$ y $\text{Ag}_2\text{AsS}_2 < \text{AgCl} < \text{Ag natural}$. El colector Aerophine 3418A mostró la óptima electividad y capacidad para capturar a los minerales de la plata. El rescate en su totalidad

del plomo, en laboratorio, resultó el 65.16% y de la plata el 87.81%. En comprobaciones de la industria del recorrido cerrado, utilizando únicamente la alternancia, se logró una recuperación total de plomo del 67.71% y de plata del 87.64%. La investigación concluyó que el uso de Aerophine 3418A en combinación con un protocolo de alternancia es eficaz a fin de mejorar el rescate de plomo y plata de minerales de baja ley y mineralogía compleja.

Gonzales (2023) en su estudio titulado “Procedimiento del mineral sulfurado a fin de rescatar el acumulado de aglutinado del zinc, del plomo y del cobre, en la Organización de Administración Cerro S.A.C.,Pasco, año 2020”. Se enfocó en un mineral que contiene 1.35% de zinc, 0.76% de plomo, 0.26% de cobre y un notable 10.51 oz/t de plata. La investigación incluyó el análisis de la dimensión de partículas, la cinética de alternancia, el retorno en línea y la óptica microscopía cuantitativa y cualitativa. Los resultados revelaron que el mineral es mayoritariamente sulfurado y contiene como galena plomo, como esfalerita zinc, como cobres grises cobre y como sulfosales de plomo-plata principalmente plata y como cobre-plata en menos cantidad. Se llevaron a cabo siete comprobaciones totales de alternancia abierta, de la etapa rougher a la desunión, con densidad 1,340 g/l y P80 de 120 μ m, variando principalmente el consumo de reactivos. Los resultados indicaron que el mineral tiene una alta proporción de sulfuros flotables. En el acumulado del cobre, se obtuvo 21.07% de cobre y 643.09 oz/t de plata; en el acumulado del plomo, 58.00 g/t de plomo y 75.79 oz/t de plata; y en el acumulado del zinc, 60.32% de zinc. Las recuperaciones fueron de 70.35% al cobre, 77.93% al plomo, 72.85% al zinc y 93.38% a la plata. Estos resultados se alcanzaron por medio de un complejo de ZnSO_4 : NaCN (4:1) tal cual depresor del zinc además del sulfato del zinc, recolectores Z-11 y AP-3418 a la flotación bulk, sulfato de cobre tal cual reactivador de zinc y AP-3894 tal cual secundario recolector. En la etapa de desunión, fue empleado un

complejo de 60% de bicromato sódico, 20% de CMC y 20% de monosódico fosfato, en flotación cobre y en hundimiento plomo.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Flotación de minerales

El proceso de flotación es un método crucial en la industria minera para separar minerales valiosos de la ganga, utilizando propiedades fisicoquímicas de las superficies de los minerales (Ganoza, 2023).

El principio básico detrás de la flotación se basa en la capacidad de ciertos minerales de adherirse a burbujas de aire y elevarse a la superficie de una suspensión acuosa, formando una espuma, mientras que otros minerales permanecen en la pulpa o colas (Ganoza, 2023). Esta selectividad se logra mediante el uso de reactivos químicos conocidos como colectores, espumantes y modificadores de pH, que se añaden a la pulpa mineral durante el proceso (Carvo et al., 2021).

El proceso comienza con la preparación del mineral mediante trituración y molienda para liberar los minerales de interés de la ganga y reducir el tamaño de partícula a un nivel adecuado para la flotación (Ganoza, 2023). Esto facilita la exposición de las superficies de los minerales al agua y a los reactivos químicos.

Una vez molido, el mineral se mezcla con agua en la presencia de reactivos químicos. Los colectores son compuestos químicos que se seleccionan específicamente para adherirse selectivamente a la superficie de los minerales de interés, haciéndolos hidrófobos (Arce et al., 2023). Estos colectores pueden ser compuestos orgánicos como xantatos, ditiocarbamatos, o sales de ácidos grasos, dependiendo de la naturaleza de los minerales a ser flotados (Gonzales, 2020).

Variables operacionales del proceso de flotación (Fuerstenau et al., 2003):

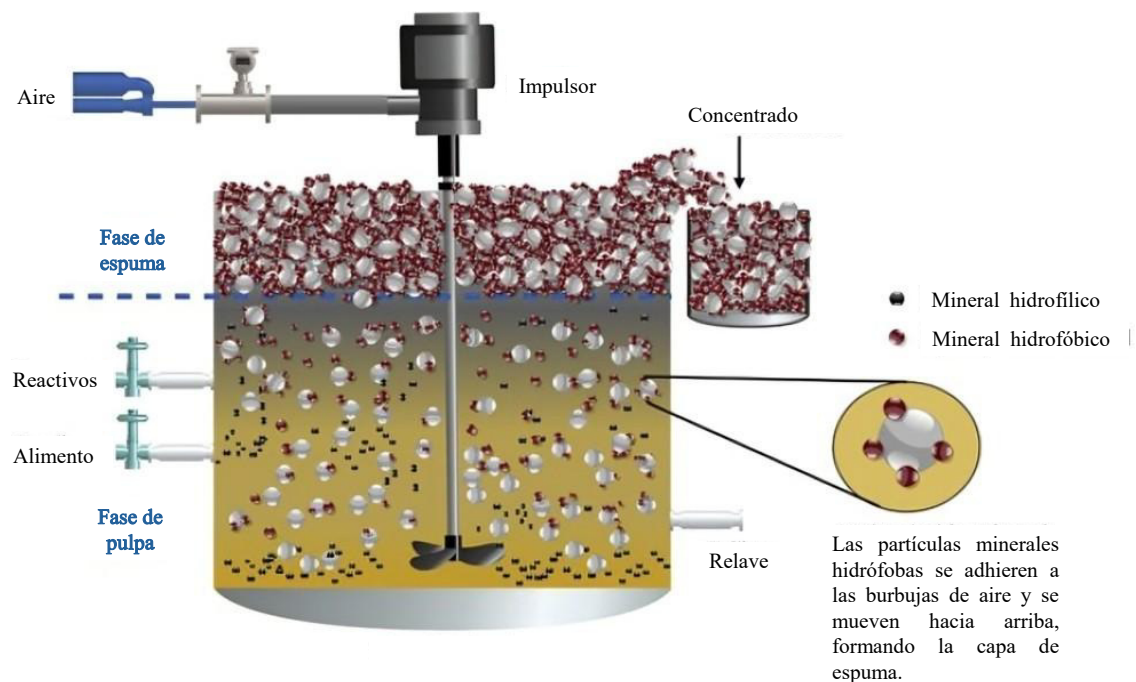
- pH del medio: El valor del pH tiene un efecto directo sobre las propiedades superficiales de las partículas minerales, así como en la eficacia de los reactivos utilizados en flotación, tales como colectores, espumantes y depresores. Es fundamental ajustar este parámetro para optimizar la selectividad y la acción específica de cada reactivo.
- Dosificación de reactivos: Los reactivos juegan un rol esencial en el proceso de flotación. Los colectores promueven la adherencia de las partículas a las burbujas de aire, los espumantes estabilizan la espuma generada, y los depresores inhiben la flotación de minerales no deseados. Por ello, su dosificación debe ser cuidadosamente controlada para lograr una separación eficiente.
- Tamaño de partícula: Esta variable afecta la capacidad de las partículas para unirse a las burbujas de aire. Tanto partículas demasiado finas como excesivamente gruesas pueden dificultar el proceso de flotación, reduciendo la eficiencia global del sistema.
- Velocidad de agitación: Junto con la aireación, la agitación determina el tamaño y la distribución de las burbujas dentro de la celda de flotación. Una agitación inadecuada puede afectar negativamente la formación de espuma y la adhesión de partículas, disminuyendo así la eficacia del proceso.
- Densidad de la pulpa: La pulpa, constituida por una mezcla de partículas sólidas y agua, debe mantener una densidad adecuada para asegurar la correcta flotación. Una densidad mal controlada puede alterar la flotabilidad de las partículas y afectar la calidad de la separación.
- Tiempo de flotación: El tiempo de residencia de las partículas en contacto con las burbujas de aire es determinante para la recuperación del mineral. Tiempos

insuficientes pueden provocar pérdidas por baja recuperación, mientras que tiempos excesivos pueden comprometer la selectividad del proceso.

- Temperatura: Esta variable influye en la solubilidad de los reactivos químicos y en la viscosidad del medio en el que se lleva a cabo la flotación. Un incremento en la temperatura puede favorecer ciertas reacciones cinéticas, sin embargo, también puede generar efectos adversos en la eficiencia del proceso, dependiendo de las condiciones operativas y del tipo de mineral tratado.
- Distribución del aire: Es fundamental garantizar una distribución homogénea del aire dentro de la celda de flotación, ya que esto permite que todas las partículas tengan una oportunidad uniforme de interactuar con las burbujas, lo cual mejora la eficiencia global del proceso de separación.

Figura 1

Representación esquemática de la celda y el proceso de flotación



Nota: Puente (2023).

3.2.1.1. Flotación de minerales de cobre-plata

Los minerales de cobre, tales como la calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y covelina (CuS), presentan una buena respuesta al proceso de flotación cuando se emplean reactivos apropiados, incluyendo colectores como los xantatos y ditiofosfatos, espumantes del tipo alcoholes o glicoles, y modificadores como la cal o el sulfato de zinc. En cuanto a la plata, esta suele encontrarse asociada a minerales sulfurados, como la pirargirita, o bien en forma de inclusiones dentro de galena y esfalerita, lo que implica que su recuperación está frecuentemente vinculada al tratamiento de minerales polimetálicos.

El proceso de flotación comienza con una etapa de molienda, cuyo objetivo es liberar las partículas mineralizadas. Posteriormente, se realiza el acondicionamiento con reactivos, seguido de la introducción de aire y la recolección del concentrado en celdas de flotación. El pH del medio es un parámetro crítico, ya que condiciona la activación o inhibición de determinadas especies minerales. Por ejemplo, en condiciones alcalinas (pH entre 10 y 11), se favorece la flotación de la calcopirita, mientras que la pirita puede ser selectivamente deprimida mediante la adición de cal.

En yacimientos que contienen cobre y plata, la presencia de minerales secundarios de cobre como cuprita, malaquita o azurita, así como de plata nativa, puede requerir la utilización de colectores específicos o la aplicación de métodos combinados, como la flotación con sulfidización, particularmente en minerales de carácter oxidado.

La eficiencia en la recuperación de la plata está fuertemente influenciada por su mineralogía. Cuando esta se presenta finamente diseminada o como inclusiones submicroscópicas, puede ser necesario implementar estrategias como flotación selectiva,

reactivación mediante iones metálicos, o incluso tratamientos previos como la lixiviación o la cianuración complementaria.

Los aspectos más resaltantes de la flotación de cobre-plata

a. Superficie química del cobre -plata y su flotabilidad

El cobre se encuentra principalmente en forma de sulfuros (como calcopirita, bornita, calcocita), que poseen una superficie naturalmente hidrofóbica bajo condiciones reductoras. Sin embargo, la presencia de oxígeno y pH alcalino genera la oxidación superficial del cobre, formando películas de óxidos e hidróxidos que disminuyen su flotabilidad. Para revertir este efecto, se emplean colectores sulfhídricos como los xantatos, que se adsorben sobre las superficies sulfurosas formando compuestos organometálicos que promueven la hidrofobicidad y, por tanto, su recuperación (Gonzales, 2020).

La plata, aunque puede encontrarse en forma nativa, se presenta comúnmente como sulfuros (argentita - Ag_2S) o incorporada en minerales como galena o tetraedrita. Su flotabilidad es variable y depende de su modo de ocurrencia mineralógica. La plata metálica es poco reactiva y, por tanto, poco flotable directamente, pero en forma de sulfuro puede adsorber colectores como los xantatos o ditiocarbamatos (Gonzales, 2020). Además, su flotabilidad mejora significativamente cuando se encuentra asociada a minerales flotables, como la galena o los sulfuros de cobre, permitiendo una flotación colectiva.

La flotabilidad tanto del cobre como de la plata está fuertemente influenciada por parámetros como el pH, el potencial redox, y la presencia de especies oxidantes o reductoras en la pulpa. Una adecuada regulación de estos factores permite optimizar su recuperación y controlar la selectividad frente a otros sulfuros metálicos (Gonzales, 2020).

b. El efecto del tamaño de partícula en la flotación

El tamaño de partícula constituye un parámetro fundamental que influye de manera significativa en la eficiencia del proceso de flotación y en la efectividad global de la separación mineral (Gonzales, 2020). Es un factor determinante en la flotación de minerales, ya que incide directamente en la liberación del mineral útil, la cinética del proceso, la selectividad de los reactivos y la calidad del concentrado obtenido (Paliza & Quispe, 2024). Su adecuada gestión permite maximizar la recuperación de minerales de interés y minimizar los costos asociados a la operación minera.

A continuación, se describen los principales aspectos mediante los cuales este factor incide en el rendimiento del proceso:

- **Liberación mineral:** La eficiencia en la separación de minerales valiosos de la ganga depende en gran medida del tamaño alcanzado durante las etapas de trituración y molienda. Un tamaño de partícula más fino permite una mayor superficie de contacto, lo que favorece la interacción con los reactivos de flotación y facilita la formación de espuma (Gonzales, 2020).
- **Cinética de flotación:** Las partículas finas, al tener mayor área específica, presentan una mayor probabilidad de adherirse a las burbujas de aire, lo que mejora la velocidad de recuperación del mineral durante la flotación. En contraste, las partículas más gruesas tienden a flotar más lentamente (Gonzales, 2020).
- **Selectividad del colector:** El tamaño de las partículas también condiciona la eficacia y la dosificación de los colectores. En general, las partículas gruesas requieren mayores cantidades de colector para lograr una recuperación adecuada,

mientras que en las partículas finas la adsorción del reactivo es más eficiente, permitiendo utilizar menores dosis (Paliza & Quispe, 2024).

- **Arrastre de partículas:** Las partículas ultrafinas pueden ser arrastradas hacia el concentrado sin haberse separado completamente de la ganga, lo que reduce la ley del concentrado y disminuye la eficiencia global del proceso. Por ello, es esencial evitar la sobremolienda y controlar adecuadamente el tamaño de partícula (Paliza & Quispe, 2024).
- **Consumo energético:** La reducción del tamaño de partícula a niveles muy finos implica un mayor consumo de energía, lo que puede incrementar considerablemente los costos operativos. Por lo tanto, se debe alcanzar un equilibrio entre la liberación efectiva del mineral y el uso eficiente de la energía (Paliza & Quispe, 2024).
- **Control de la granulometría:** La aplicación de técnicas de clasificación y control granulométrico en la alimentación al circuito de flotación permite optimizar el rendimiento del proceso. Esto incluye, por ejemplo, la separación previa de partículas gruesas o la prevención de la generación excesiva de finos (Paliza & Quispe, 2024).

c. Selección de colector y dosificación

La adecuada selección de colectores representa un factor clave en la optimización del proceso de flotación de minerales que contienen cobre y plata. Estos reactivos

cumplen la función de modificar la superficie de los minerales valiosos, generando una condición de hidrofobicidad que permite su adhesión a las burbujas de aire durante el proceso de flotación.

En el caso de minerales sulfurados de cobre como la calcopirita, bornita y covelina, los colectores más utilizados son los xantatos, destacando entre ellos el xantato amílico de potasio (PAX) y el xantato de etilo (PEX). Estos compuestos se adsorben químicamente sobre la superficie mineral, formando una capa hidrofóbica a través de mecanismos de quimisorción con los iones metálicos presentes (Bulut et al., 2021).

Cuando la plata se encuentra en forma de sulfosales, tales como la pirargirita o proustita, o como inclusiones dentro de galena o esfalerita, la flotación se lleva a cabo con colectores típicos para minerales de plomo y zinc. En estos casos, los ditiolfosfatos ofrecen mayor selectividad, especialmente en condiciones de pH neutro o ligeramente ácido (Bulut et al., 2021). Colectores modificados como el Aero 3418A o Aero 3477 han demostrado ser particularmente efectivos en la flotación selectiva de sulfuros de plata, incluso en presencia de otros minerales sulfurados.

Para minerales oxidados de cobre, como la malaquita o azurita que pueden coexistir con especies argentíferas, los xantatos resultan ineficaces. En estos escenarios, se emplea una etapa previa de sulfidización con sulfuro de sodio (Na_2S), seguida de la aplicación de colectores alternativos como los ditiocarbamatos o los hidroxamatos, los cuales permiten una flotación más eficiente de estos minerales (Luo et al., 2022).

Dada la variabilidad mineralógica de los depósitos cobre-plata, frecuentemente se requiere la aplicación de mezclas de colectores o su uso secuencial en distintas etapas del proceso. Esto permite ajustar tanto el tipo de colector como su dosificación en función de los resultados obtenidos en pruebas metalúrgicas de laboratorio.

En síntesis, la elección del colector adecuado para la flotación de minerales cobre-plata depende de diversos factores, entre ellos:

- La naturaleza del mineral (sulfurado u oxidado),
- La forma mineralógica de la plata,
- Las condiciones de pH del medio de flotación,
- La presencia de minerales de ganga flotables, como la pirita o ciertas arcillas.

d. Selección del espumante para separación de cobre-plata

En la flotación de minerales que contienen cobre y plata, los espumantes cumplen una función crítica al facilitar la formación de una espuma estable, la cual permite la captura y el transporte eficiente de las partículas hidrofobizadas hacia la superficie del sistema. Si bien estos reactivos no inducen la hidrofobicidad del mineral, su presencia es determinante en la eficacia del proceso de separación.

Los espumantes comúnmente utilizados son compuestos orgánicos como alcoholes, glicoles y éteres, cuya acción principal es reducir la tensión superficial del agua, favoreciendo así la generación de burbujas de aire con un tamaño adecuado. La selección del tipo de espumante, su dosificación y posible combinación con otros productos inciden directamente en la estabilidad, altura y movilidad de la espuma, así como en la cinética del proceso de flotación (Bulut et al., 2021).

En el caso de minerales de cobre-plata, se busca generalmente una espuma con estabilidad moderada que permita maximizar la recuperación de especies valiosas, minimizando al mismo tiempo el arrastre de ganga. En este contexto, el Metil Isobutil Carbinol (MIBC) es uno de los espumantes más utilizados debido a su capacidad para generar burbujas finas y estables, lo que favorece la flotación de minerales sulfurados

finamente diseminados como la calcopirita y diversos sulfosales de plata (Arasavelli et al., 2023).

En situaciones donde se requiere mejorar la selectividad del proceso, por ejemplo, al recuperar sulfosales de plata asociadas a galena o esfalerita, es posible combinar el MIBC con glicoles polietoxilados u otros espumantes de mayor polaridad. Esta estrategia permite reducir el arrastre de partículas finas no deseadas, optimizando la calidad del concentrado (Arasavelli et al., 2023).

Asimismo, la elección del espumante más adecuado debe considerar otros parámetros operativos relevantes, tales como:

- El tipo de celda de flotación empleada (mecánica o tipo columna),
- Las condiciones de pH y temperatura del sistema,
- La interacción del espumante con los colectores y modificadores presentes en la pulpa.

Es importante mantener un equilibrio en la estabilidad de la espuma: una espuma excesivamente estable puede generar arrastre no deseado de ganga y reducir la velocidad de transporte, mientras que una espuma demasiado inestable puede comprometer la recuperación de los minerales valiosos.

Tabla 1*Reactivos para la flotación de cobre-plata*

Tipo de Reactivo	Función Principal	Ejemplos	Aplicación
Colector	Hidrofobizar minerales valiosos (Cu, Ag) para facilitar su adhesión a burbujas de aire.	- Xantato de potasio amílico (PAX) - Xantato de etilo (PEX) - Ditiósfatos (Aero 3418A, 3477) - Ditiocarbamatos	Xantatos: eficaces en sulfuros de cobre. Ditiósfatos: más selectivos, usados para sulfosales de plata. Ditiocarbamatos: útiles en flotación de óxidos sulfidizados.
Modificador de pH	Controlar el pH de la pulpa para optimizar la acción de otros reactivos.	- Cal (CaO) - Ácido sulfúrico (H₂SO₄)	Cal: eleva el pH, deprime pirita y mejora la flotación de calcopirita. Ácido: se usa para mantener pH ácido en casos específicos.
Depresor	Evitar la flotación de minerales no deseados (ganga).	- Sulfato de zinc (ZnSO₄) - Cianuro de sodio (NaCN) - Bicarbonato de sodio (NaHCO₃)	ZnSO₄: deprime esfalerita. NaCN: deprime galena o pirita (uso controlado por toxicidad).
Activador	Mejorar la flotación de ciertos minerales mediante reacciones químicas en la superficie.	- Sulfato de cobre (CuSO₄) - Sulfuro de sodio (Na₂S)	CuSO₄: activa esfalerita y algunos minerales de plata. Na₂S: sulfidiza minerales oxidados de cobre y plata para flotación.

Nota: Bulut et al., 2021.

Tabla 2

Espumante utilizados en los procesos de flotación de cobre (Cu) - plata (Ag)

Tipo de Espumante	Nombre Químico	Características Principales	Aplicación
Alcohol alifático	MIBC (Metil Isobutil Carbinol)	Espuma de altura moderada - Buena movilidad - Baja viscosidad	El más utilizado en flotación de sulfuros de cobre-plata. Ideal para generar burbujas finas y estables.
Poliglicol	Polyfroth 52, Dowfroth 250, 1012	Espuma más densa y estable - Control de arrastre de partículas finas	Recomendados cuando se necesita más control de la espuma o en circuitos complejos.
Éteres y alcoholes pesados	DF-250, DF-1012 (Dow)	Mayor estabilidad y duración de la espuma	Útiles en flotación en celdas columna o minerales con partículas finas.
Alcoholes terpénicos	Tergitol, pine oil (aceite de pino)	Espumas suaves, menor estabilidad - Aromáticos naturales	Usados como modificadores de espumas en combinación con otros espumantes. Pueden ayudar a reducir el arrastre.
Mezclas sintéticas	F-1, A-65 (combinaciones de glicoles y alcoholes)	Propiedades balanceadas según formulación	Diseñadas para condiciones específicas de flotación (pH, tipo de celda, mineralogía).

Nota: (Arasavelli et al., 2023).

3.2.1.2. Los principales minerales de cobre y plata son

- Calcopirita (CuFeS_2): Es el mineral de cobre más abundante y la principal fuente de extracción de este metal a nivel mundial. Su importancia radica no solo en su abundancia, sino también en su contenido de cobre y su distribución geológica (Acha, 2020).
- Bornita (Cu_5FeS_4): La bornita, también conocida como "mineral pavonado", es un mineral de sulfuro de cobre y hierro con la fórmula química Cu_5FeS_4 . Es una importante mena de cobre debido a su alto contenido de este metal y su frecuente presencia en depósitos de cobre alrededor del mundo (Leyton, 2020).
- Calcosina (Cu_2S): Es uno de los minerales más ricos en cobre. Es uno de los minerales de cobre más ricos y valiosos debido a su alto contenido de cobre. Es una importante mena de cobre y se encuentra en numerosos depósitos minerales en todo el mundo (Guerrero, 2021).
- Enargita (Cu_3AsS_4): Este mineral de cobre arseniado también puede ser flotado en el proceso de recuperación de cobre y molibdeno. Aunque es menos común que la calcopirita o la bornita, se encuentra en algunos depósitos mixtos de cobre y molibdeno (Leyton, 2020).
- Covellita (CuS): Aunque menos común, también es una fuente de cobre. Mineral de sulfuro de cobre. Aunque menos común en comparación con otros minerales de cobre, sigue siendo una fuente significativa de este metal. Su presencia en ciertos depósitos minerales y sus características únicas hacen que la covellita sea de interés en la minería del cobre (Acha, 2020).
- Cuprita (Cu_2O): Un mineral de óxido de cobre. Es un mineral de óxido de cobre y una fuente significativa de cobre debido a su alto contenido de este metal.

Aunque menos común que los sulfuros de cobre, la cuprita es notable por su estructura cristalina y su apariencia distintiva (Sapiains et al., 2020).

- Malaquita ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$): Un mineral de carbonato de cobre. Es ampliamente conocido no solo por ser una fuente importante de cobre, sino también por su llamativo color verde y su uso ornamental en joyería y arte decorativo (Sapiains et al., 2020).

3.2.1.3. Yacimientos de cobre-plata

Los yacimientos de cobre-plata se originan a partir de diversos procesos geológicos, principalmente hidrotermales, sedimentarios y magmáticos. En muchos casos, estos metales se concentran por circulación de fluidos ricos en metales a través de rocas permeables o fracturadas (Zou et al., 2022). En ambientes sedimentarios, la plata puede precipitar junto con sulfuros de cobre, formando minerales como bornita, calcosina o argentita (Sheng et al., 2021).

Tipos de Yacimientos Cobre-Plata

Los principales tipos de yacimientos cobre-plata incluyen:

- Yacimientos tipo pórfido: con gran volumen de mineralización diseminada, generalmente en rocas intrusivas. La plata suele ser un subproducto (Sillitoe, 2010).
- Yacimientos estratoligados: en cuencas sedimentarias, como los depósitos tipo Kupferschiefer en Europa Central.
- Yacimientos epitermales: formados a temperaturas moderadas, donde la plata puede ser más abundante que el cobre (Arndt, 2023).

3.2.1.4. Propiedades del cobre-plata

Ambos metales son altamente maleables y dúctiles, lo que los hace ideales para aplicaciones eléctricas, electrónicas y ornamentales. La aleación Cu-Ag mantiene alta conductividad eléctrica incluso a temperaturas elevadas, lo que es útil en aplicaciones aeroespaciales y ferroviarias (Callister & Rethwisch, 2020).

- Propiedades físicas:

El sistema cobre-plata (Cu–Ag) combina dos metales con excelentes propiedades físicas, lo que lo hace altamente valorado en diversas aplicaciones industriales. Ambos metales son conocidos por su alto brillo metálico, notable maleabilidad y ductilidad, así como su excelente conductividad eléctrica y térmica.

El cobre es un metal de color rojizo con una densidad de aproximadamente 8.96 g/cm³ y un punto de fusión de 1084.62 °C. Es el segundo mejor conductor eléctrico después de la plata y presenta una alta resistencia mecánica, lo que lo hace ideal para usos estructurales y eléctricos. La plata, por su parte, es un metal blanco brillante, más denso (10.49 g/cm³) y con un punto de fusión ligeramente más bajo (961.78 °C). Tiene la mayor conductividad eléctrica y térmica de todos los elementos, y su maleabilidad es excepcional.

Cuando se combinan, incluso en pequeñas proporciones (por ejemplo, 0.1–1% de plata en cobre), las aleaciones Cu–Ag conservan una alta conductividad eléctrica al tiempo que mejoran la resistencia al desgaste y la estabilidad térmica. Esto las hace especialmente útiles en la fabricación de contactos eléctricos, conductores de alto rendimiento y componentes electrónicos donde se requiere eficiencia y durabilidad.

3.2.1.5. Usos y aplicaciones

El cobre y la plata son los metales más conductores de electricidad, siendo ampliamente utilizados en:

- Cables y conductores eléctricos de alto rendimiento.
- Contactos eléctricos y conmutadores.
- Componentes electrónicos como conectores, microchips y circuitos impresos.
- Aleaciones Cu–Ag en líneas de alta tensión, trenes eléctricos y sistemas ferroviarios (por su resistencia al desgaste y buena conductividad a altas temperaturas).

CAPÍTULO III: Metodología

3.1. Tipo y diseño de investigación

Se empleó un diseño experimental adecuado a las características de la materia prima mineral para recuperar cobre con contenido de plata. Se enfocó en la caracterización mineralógica utilizando principalmente el microscopio óptico polarizador. Este enfoque permitió obtener una comprensión detallada del comportamiento de los minerales durante el proceso de flotación, tanto aquellos de valor como los componentes de la ganga. El análisis se centró en identificar las propiedades ópticas clave de los minerales, esenciales para la selección del proceso adecuado de recuperación. Además, la investigación se considera de tipo aplicado, ya que se busca resolver la problemática específica mediante la cuantificación de datos, con el objetivo de optimizar la recuperación de la asociación de cobre y plata en minerales sulfurados en Huaraz, Ancash.

3.2. Variables de investigación

3.2.1. Variable independiente

- Granulometría (P80)
- Xantato isopropílico de sodio (g/TM)

3.2.2. Variable dependiente

- Calidad del concentrado de cobre:

Variables constantes

- pH
- % Sólidos
- Densidad de Pulpa (Kg/L)
- Tiempo de Acondicionamiento (min)
- Tiempo de flotación (min)
- RPM Celda de Flotación (Nº de vueltas por min.)
- Flujo de Aire (L/min)

3.3. Operacionalización de variables

Para la evaluación de cómo influyen las variables para recuperar el cobre-plata, se utilizó el diseño factorial desarrollado con el software Minitab 19 para realizar el análisis estadístico. Con los resultados obtenidos de los balances metalúrgicos de cada prueba desarrollada, se interpretará y analizará la influencia entre las variables involucradas, como son: las variables dependientes e independientes.

3.3.1. Matriz de operacionalización de variables

Tabla 3

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Tipo de variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento
Granulometría (P80)	Independiente	Tamaño de partícula	P80 (tamaño de partícula en malla o micras)	Micras (μm)	Tamiz, analizador láser
Xantato isopropílico de sodio	Independiente	Dosificación de reactivo	g de reactivo por tonelada de mineral	g/TM	Balanza de precisión
Calidad del concentrado de cobre	Dependiente	Ley del concentrado Recuperación	% de Cu en el concentrado % de recuperación	% Cu % recuperación	Ensayo químico (AA, ICP) Balanza
pH	Constante	Acidez o alcalinidad de la pulpa	Valor de pH durante la flotación	Unidad de pH	pH-metro

% de sólidos	Constante	Concentración de sólidos en la pulpa	% de sólidos en la pulpa	%	Balanza, cálculo gravimétrico
Densidad de pulpa	Constante	Relación masa-volumen	Kg/L	Kg/L	Densímetro, picnómetro
Tiempo de acondicionamiento	Constante	Duración del acondicionamiento	Tiempo en minutos	min	Cronómetro
Tiempo de flotación	Constante	Duración del proceso de flotación	Tiempo en minutos	min	Cronómetro
RPM Celda de flotación	Constante	Velocidad de agitación	Número de revoluciones por minuto	rpm	Tacómetro
Flujo de aire	Constante	Caudal de aire en la celda	Litros de aire por minuto	L/min	Caudalímetro

Nota: Elaboración propia

3.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis de la presente investigación está constituida por las pruebas experimentales de flotación realizadas sobre muestras de minerales sulfurados con contenido de cobre y plata, provenientes de la zona de Huaraz – Áncash.

Estas pruebas se ejecutan en condiciones controladas de laboratorio, donde se varían de forma sistemática dos factores principales: la granulometría (P80) del mineral y la dosificación de xantato isopropílico de sodio (g/TM), con el objetivo de evaluar su influencia sobre la calidad del concentrado de cobre, expresada en términos de ley (%) y recuperación (%).

Cada ensayo de flotación representa una unidad experimental independiente, bajo parámetros constantes tales como el pH, porcentaje de sólidos, densidad de pulpa, tiempo de acondicionamiento, tiempo de flotación, velocidad de agitación (RPM) y flujo de aire, los cuales se mantienen estables para asegurar la validez de los resultados obtenidos.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

El grupo de muestra seleccionado fue obtenido de la zona situada en Huaraz, Ancash. Se llevará a cabo la caracterización y análisis de elementos totales tanto en muestra sólida como en pulpa en el laboratorio de la planta concentradora.

3.5.2. Muestra

Se recibieron muestras de los cuerpos mineralizados localizados en Huaraz, Ancash, destinadas a su procesamiento. Se maneja una cantidad de muestra de aproximadamente 100 kg por zona de extracción, permitiendo la evaluación mineralógica necesaria para su posterior procesamiento en el laboratorio.

3.5.3. Selección de la muestra

Criterio de inclusión

Las muestras deben representar fielmente todo el stock de mineral extraído en la zona de Huaraz, Ancash. Todo el material debe ser muestreado antes de ingresar a la planta concentradora, seguido por el proceso de blending para asegurar la homogeneización del mineral. Este procedimiento incluye la preparación inicial necesaria para su posterior procesamiento.

Criterio de exclusión

Se excluyen muestras que no cumplan con el proceso estándar de preparación. Específicamente, se requiere que el producto obtenido del chancado sea mecánicamente preparado en una chancadora de quijada hasta lograr una granulometría 100% pasante por una malla 10. Posteriormente, este producto se someterá a molienda en húmedo para caracterización mineralógica y para las diversas pruebas metalúrgicas programadas, que incluyen la determinación del pH de la pulpa y la dosificación de reactivos según lo especificado en este estudio de investigación.

3.5.4. Ubicación geológica del área de estudio

El área de estudio se ubica en la provincia de Huaraz, departamento de Áncash, en la zona centro-occidental del Perú, dentro del contexto geológico de la Cordillera Blanca. Esta región se caracteriza por la presencia de sistemas mineralizados asociados a procesos hidrotermales, los cuales han dado origen a depósitos de minerales sulfurados con contenido de cobre y plata.

Geológicamente, la zona presenta unidades litológicas de origen ígneo y sedimentario, afectadas por eventos tectónicos que han favorecido la formación de

estructuras como fallas y fracturas, las cuales actúan como conductos para la circulación de fluidos mineralizantes.

La mineralización presente en el área está compuesta principalmente por sulfuros metálicos como calcopirita, pirita, esfalerita y galena, con presencia de minerales argentíferos como argentita, tetrahedrita y electrum, lo que evidencia un sistema polimetálico típico de ambientes hidrotermales.

Las muestras utilizadas en la presente investigación fueron obtenidas de esta zona, siendo representativas del material mineralizado, el cual fue sometido a procesos de caracterización mineralógica y análisis químico con el objetivo de evaluar su comportamiento en el proceso de flotación.

Figura 2

Mapa geológico del área de estudio



Nota: Elaboración propia (2026).

La geología del área de estudio influye directamente en la mineralogía del yacimiento, lo cual condiciona el comportamiento del mineral durante el proceso de flotación. La presencia de asociaciones complejas entre minerales de cobre y plata, así

como los distintos grados de liberación observados en el análisis mineralógico, evidencian la necesidad de optimizar variables operacionales como la granulometría (P80) y la dosificación de colectores.

En este contexto, el enfoque geometalúrgico adoptado permite correlacionar las características mineralógicas con la respuesta metalúrgica del mineral, contribuyendo a mejorar la recuperación de cobre con contenido de plata en el proceso de flotación.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

- Se recopiló información para el balance metalúrgico, incluyendo los últimos procesamientos de la planta concentradora.
- Se realizó la dosificación de reactivos en la planta concentradora, con especial atención al reactivo colector Z-11.
- Se obtuvo una muestra representativa del mineral polimetálico del distrito donde se lleva a cabo la investigación.
- La muestra se preparó mecánicamente hasta alcanzar una granulometría de 100% pasante por una malla 10, seguido de la evaluación de las características del mineral en cada zona de extracción.
- La muestra finamente molida se envió al laboratorio para estudios químicos con el fin de determinar las leyes de cobre (Cu), junto con sus asociaciones, como el oxígeno (O) y el azufre (S).
- Se utilizó la microscopía óptica en el laboratorio para la caracterización mineralógica, examinando las características de tamaño de partículas, liberación y tipo mineralógico.

- Se realizaron ensayos de flotación de cobre basados en las características específicas del mineral, evaluando el impacto de variaciones en la dosificación de Na_2S , tamaño de partícula y pH en la recuperación del concentrado, en la dosificación del reactivo colector Z-11.
- Se optimizaron las variables más influyentes en la recuperación para cada zona mediante el análisis de datos del proceso de flotación utilizando software estadístico como Minitab 19 y Excel.
- Se llevaron a cabo pruebas en laboratorio utilizando los resultados obtenidos del software para determinar el blending y la dosificación adecuada que maximizara el rendimiento metalúrgico del concentrado de cobre.

Estas metodologías aseguraron una evaluación exhaustiva de las condiciones óptimas para la recuperación eficiente de cobre con contenido de plata a partir de minerales sulfurados en Huaraz, Ancash, con un enfoque particular en el reactivo colector Z-11.

3.6.2. Análisis e interpretación de la información

Se llevó a cabo un muestreo sistemático conforme a los estándares de laboratorio para recopilar datos sobre la recuperación de cobre con contenido de plata a partir de minerales sulfurados en Huaraz, Ancash. Las muestras fueron clasificadas y codificadas según sus características específicas, y luego enviadas al laboratorio para la realización de ensayos pertinentes.

Los resultados de estos ensayos fueron analizados de manera exhaustiva utilizando el programa de análisis y control estadístico de procesos Minitab 19.

CAPÍTULO IV: Resultados y discusión

4.1. Presentación de resultados

4.1.1. *Análisis mineralógico del mineral sobre una sección pulida*

La muestra representativa del mineral proveniente de Huaraz (Figura 3) se envió al laboratorio de microscopía óptica. Para el análisis de la muestra se utilizó la microscopía óptica polarizante de luz reflejada, esto permitió identificar los componentes mineralógicos (ver Tabla 4), las distribuciones volumétricas de los minerales que han participado en el estudio modal, los niveles de liberación de cada mineral.

Figura 3

Mineral proveniente de Huaraz



Nota: Fotografía del mineral sacado del yacimiento.

Tabla 4*Minerales que contiene la muestra representativa (malla -325)*

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Oro	Au	Au
Electrum	(Au,Ag)	el
Esfalerita	ZnS	ef
Calcopirita	CuFeS ₂	cp
Tetrahedrita	Cu ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	td
Galena	PbS	gn
Argentita	Ag ₂ S	agt
Petzita	Ag ₃ AuTe ₂	ptz
Silvanita	AgAuTe ₄	syl
Magnetita	Fe ₃ O ₄	mt
Hematita	Fe ₂ O ₃	hm
Pirita	FeS ₂	py
Rutilo	TiO ₂	rt
Goethita	FeO.OH	gt
Calcocita	Cu ₂ S	cc
Covelita	CuS	cv
Digenita	Cu ₉ S ₅	dg
Pirrotita	Fe _{1-X} S	po
Gangas		GGs

Nota: Información proporcionada por Geoexinpesac.

4.1.1.1. Interpretación mineralógica

El oro ocupa el 0.26 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 49.38 % se halla libre, mientras que el 50.62 % restante, se encuentra aún entrelazada, el motivo de su no liberación total se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos.

El electrum ocupa el 0.03 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, mientras que el 100.00 % restante, se encuentra aún entrelazada.

La esfalerita ocupa el 1.57 % del volumen total de la muestra, de este volumen, el 66.39 % se halla libre, mientras que el 33.61 % restante, se encuentra aún entrelazada.

La calcopirita ocupa el 0.66 % del volumen total de la muestra, de este volumen 59.41% se halla libre, habiendo quedado el 40.59 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso.

La tetrahedrita ocupa el 0.30 % del volumen total de la muestra, de este volumen 43.48 % se halla libre, habiendo quedado el 56.52 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

La galena ocupa el 0.30 % del volumen total de la muestra, de este volumen 64.52 % se halla libre, habiendo quedado el 35.48 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

La argentita ocupa el 0.16 % del volumen total de la muestra, de este volumen 83.33% se halla libre, habiendo quedado el 16.67 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

La petzita ocupa el 0.12 % del volumen total de la muestra, de este volumen 59.41 % se halla libre, habiendo quedado el 40.59 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

La silvanita ocupa el 0.02 % del volumen total de la muestra, de este volumen 0.00 % se halla libre, habiendo quedado el 100.00 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

La magnetita ocupa el 0.32 % del volumen total de la muestra, de este volumen 61.22% se halla libre, habiendo quedado el 38.78 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

La hematita ocupa el 0.38 % del volumen total de la muestra, de este volumen 84.75% se halla libre, habiendo quedado el 15.25 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

La pirita ocupa el 11.09 % del volumen total de la muestra, de este volumen 94.73 % se halla libre, habiendo quedado el 5.27 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

El rutilo ocupa el 0.03 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00 % se halla libre, mientras que el 100.00 % restante se encuentra entrelazado.

La goethita ocupa el 0.01 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, mientras que el 100.00 % restante, se encuentra aún entrelazada, el motivo de su no liberación total.

La ganga ocupa el 84.75 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 96.44% se halla libre, habiendo quedado el 3.56 % restante entrelazado, el motivo de que no se haya liberado totalmente.

4.1.1.2. Distribución de volumen y grados de liberación

Tabla 5

Volumen y grados de liberación de los minerales

Minerales	Volumen porcentual	Grado de liberación porcentual (%)
Oro	0.26	49.38
Electrum	0.03	0
Esfalerita	1.57	66.39
Calcopirita	0.66	59.41
Tetrahedrita	0.3	43.48
Galena	0.3	64.52
Argentita	0.16	83.33
Petzita	0.12	0
Silvanita	0.02	0
Magnetita	0.32	61.22
Hematita	0.38	84.75
Pirita	11.09	94.73
Rutilo	0.03	0
Goethita	0.01	0
Gangas	84.75	96.44
Total	100	

Nota: Información proporcionada por Geoexinpesac.

4.1.1.3. Interpretación de los grados de liberación de los enlaces

mineralógicos

Tabla 6

Los tipos de enlaces y su respectiva posibilidad de liberación

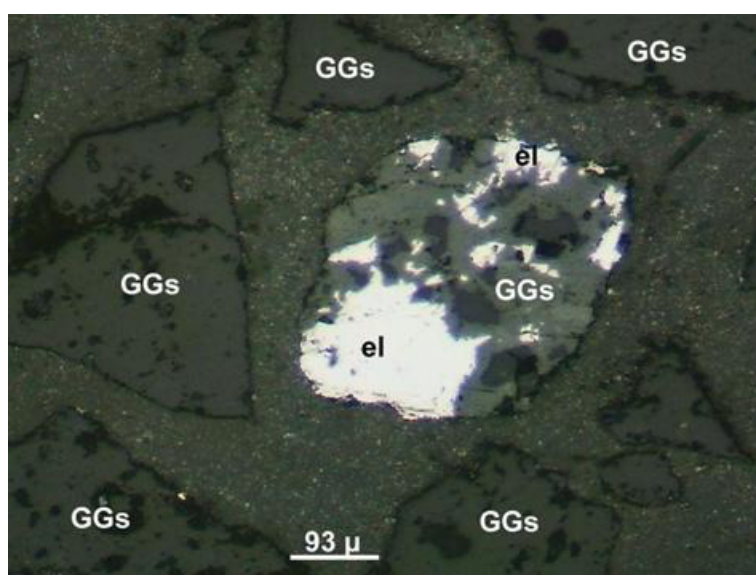
Minerales	TIPO	NUM.	DIST.	Posibilidades de liberación
entrelazados	ENTR.	PART.	PORC.	completa
Partículas Libres		1453	94.78	
Au-ptz	1aII	1	0.07	Fácil
Au-gt	1aII	1	0.07	Fácil
Au-GGs	1eI	1	0.07	Muy difícil a imposible
el-GGs	4cI	1	0.07	Muy difícil a imposible
ef-cp	1bII	1	0.07	Moderadamente fácil
	1eII	1	0.07	Muy difícil a imposible
ef-gn	3dII	3	0.2	Muy difícil a imposible
ef-py	1aII	1	0.07	Fácil
	1bI	1	0.07	Moderadamente fácil
	3dII	1	0.07	Muy difícil a imposible
ef-GGs	1bI	1	0.07	Moderadamente fácil
	1bII	1	0.07	Moderadamente fácil
	1eI	1	0.07	Muy difícil a imposible
	3dII	1	0.07	Muy difícil a imposible
cp-td	1bIV	3	0.2	Moderadamente fácil
cp-GGs	1aII	1	0.07	Fácil
	3dI	1	0.07	Muy difícil a imposible
td-GGs	1bIV	1	0.07	Moderadamente fácil
	1dIII	1	0.07	Imposible
gn-GGs	3dII	3	0.2	Muy difícil a imposible
agt-GGs	1dII	2	0.13	Imposible
ptz-syl	1eIII	1	0.07	Muy difícil a imposible
mt-hm	3cII	1	0.07	Imposible
mt-GGs	1aI	1	0.07	Fácil
	1cIII	1	0.07	Imposible
	2bI	1	0.07	Muy difícil
hm-GGs	3dII	3	0.2	Muy difícil a imposible
py-GGs	1bI	5	0.33	Moderadamente fácil
	1bIV	1	0.07	Moderadamente fácil
	1dII	3	0.2	Imposible
	1dIII	1	0.07	Imposible
	1eI	6	0.39	Muy difícil a imposible
	1eII	9	0.59	Muy difícil a imposible

	3dII	2	0.13	Muy difícil a imposible
	4cI	1	0.07	Muy difícil a imposible
rt-GGs	1dII	4	0.26	Imposible
	3bIII	1	0.07	Imposible
ef-cp-gn	1bII	3	0.2	Moderadamente fácil
ef-gn-py	1bII	1	0.07	Moderadamente fácil
	1bIV	1	0.07	Moderadamente fácil
cp-td-GGs	1bIV	1	0.07	Moderadamente fácil
Au-ptz-syl	1bII	1	0.07	Moderadamente fácil
Au-ptz-py	1bIV	1	0.07	Moderadamente fácil
td-py-GGs	1bIV	1	0.07	Moderadamente fácil
py-rt-GGs	1eII	1	0.07	Muy difícil a imposible
cp-td-gn-py	1bII	1	0.07	Moderadamente fácil
T otal		1533	100	

Nota: Información proporcionada por Geoexinpesac.

Figura 4

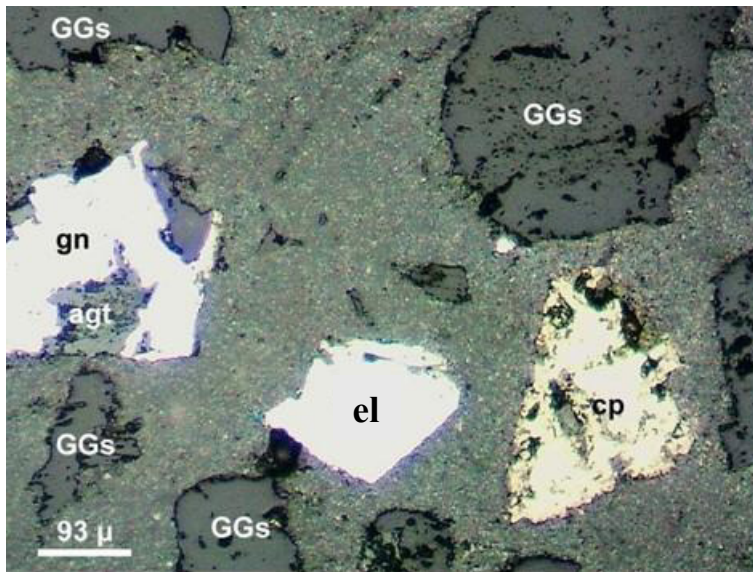
Partícula entrelazada de electrum (el) con la ganga (GGs); adyacente están las partículas libres de gangas (GGs). 200X



Nota: Información proporcionada por Geoexinpesac.

Figura 5

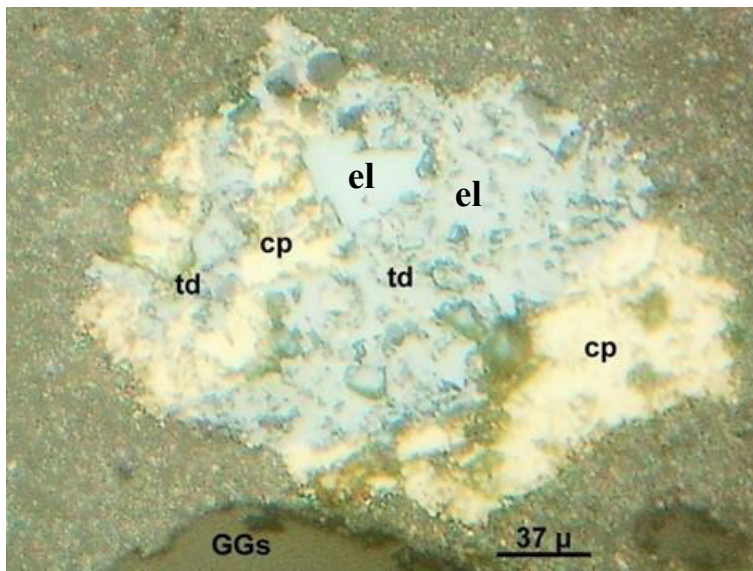
Partículas libres de calcopirita (cp), de electrum (el) y de gangas (GGs); partícula entrelazada de galena (gn) con argentita (agt). 200X.



Nota: Información proporcionada por Geoexinpesac.

Figura 6

Partícula entrelazada de calcopirita (cp) con la tetrahedrita (td) y electrum (el). 500X



Nota: Información proporcionada por Geoexinpesac.

4.1.2. Análisis químico del mineral de cabeza

El mineral de cabeza fue muestreado de forma representativa antes de su ingreso al circuito de flotación. Los análisis fueron realizados mediante espectrometría de absorción atómica (AAS) y ensayo al fuego para plata, obteniéndose los siguientes resultados como se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Composición química del mineral de cabeza

	Leyes	
	(Oz/Tc)	(%)
	Ag	Cu
Muestra de cabeza	1.57	1.85

Nota: Leyes obtenidas del análisis químico (técnica utilizada AAS).

4.1.3. Resultados de flotación cobre-plata

En el presente estudio, se realizaron ensayos de flotación con una muestra mineral proveniente de la zona de Huaraz, con el objetivo de evaluar la recuperación de cobre y plata. Las pruebas metalúrgicas se llevaron a cabo variando tanto la granulometría del mineral como la dosificación del colector xantato isopropílico de sodio.

Para determinar el tiempo óptimo de molienda, se procesó el mineral de cabeza en un molino de bolas de laboratorio tipo Denver, efectuando tres ensayos con tiempos de molienda de 4, 6 y 8 minutos (Ver Tabla 8). Los productos obtenidos en cada caso fueron sometidos a un análisis granulométrico, lo que permitió elaborar la correspondiente curva de moliendabilidad del mineral.

Tabla 8

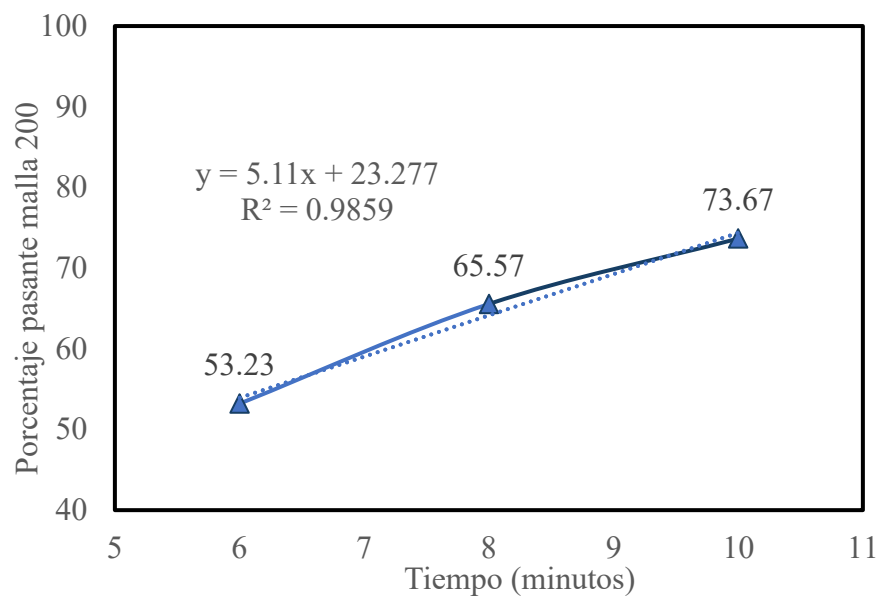
Resumen del análisis granulométrico (molienda del mineral de cabeza)

Tiempo (minutos)	%-malla 200 75 µm
6	53.23
8	65.57
10	73.67

Nota: Elaboración propia.

Figura 7

Curva de moliendabilidad del mineral de cabeza



Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se presentan las condiciones operativas empleadas durante las pruebas de flotación. Estas pruebas se llevaron a cabo modificando tanto la dosificación de xantato isopropílico de sodio como la granulometría del mineral. Como espumante, se utilizó metil isobutil carbinol (MIBC).

Tabla 9*Condiciones operativas para las pruebas de flotación*

Parámetro	Valor / Rango	Unidad
pH	7	-
Espumante	MIBC	30 g/TM
Tiempo de flotación	8	minutos
Xantato Isopropílico de sodio	30-50	g/TM
Granulometría (-200 malla)	65.57-73.67	%
% de sólidos	40-45	%

Nota: Elaboración propia.

4.1.4. Análisis de malla valorada

Con el objetivo de evaluar la distribución de los valores metálicos en función del tamaño de partícula, se desarrolló un análisis de malla valorada basado en la información granulométrica, mineralógica y los resultados de flotación obtenidos en el presente estudio.

Dado que no se realizaron ensayos directos de malla valorada, se efectuó una interpretación técnico-metalúrgica que permite estimar el comportamiento de los minerales valiosos en las diferentes fracciones granulométricas.

Desde el punto de vista mineralógico, se determinó que los minerales portadores de cobre, como la calcopirita, así como los minerales argentíferos, presentan distintos grados de liberación, siendo mayor en tamaños de partícula más finos. Esto se evidencia en los resultados de flotación, donde las mayores recuperaciones de cobre y plata se alcanzan a una granulometría de 73.67 % -200 malla.

En este contexto, se puede inferir que las fracciones más finas concentran una mayor proporción de valores metálicos liberados, mientras que en las fracciones más gruesas persisten asociaciones mineralógicas que dificultan su recuperación.

Tabla 10

Distribución inferida de valores metálicos por fracción granulométrica

Fracción granulométrica	% Peso	Tendencia de ley Cu	Tendencia de ley Ag	Interpretación
+150 μm (grueso)	Alta	Baja	Baja	Baja liberación, presencia de entrelazamientos
150–75 μm (intermedio)	Media	Media	Media	Liberación parcial
-75 μm (fino)	Menor	Alta	Alta	Alta liberación, mayor recuperación

Nota: Elaboración propia (2026).

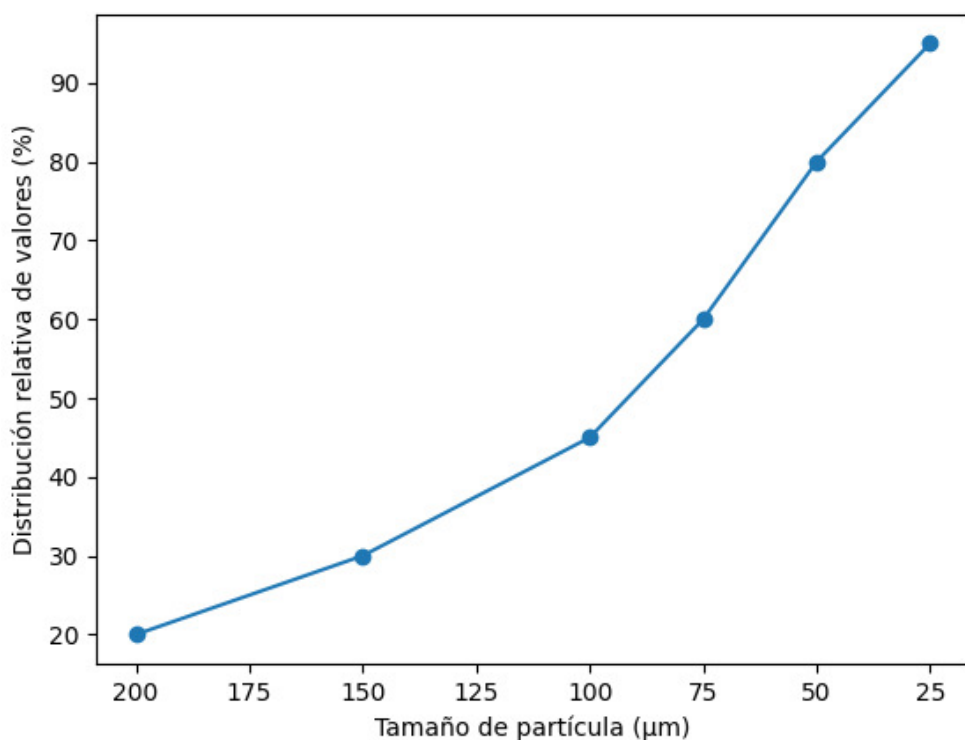
El análisis de malla valorada inferida indica que la mayor concentración de valores metálicos se encuentra en las fracciones finas del mineral, lo cual es consistente con el incremento de la recuperación observado en las pruebas de flotación a granulometrías más finas.

Este comportamiento confirma que la liberación de los minerales valiosos es un factor determinante en la eficiencia del proceso, y que una molienda adecuada permite maximizar la recuperación metalúrgica.

Asimismo, la presencia de minerales valiosos entrelazados en fracciones más gruesas sugiere que una molienda insuficiente podría generar pérdidas de cobre y plata hacia los relaves.

Figura 8

Curva de malla valorada (interpretativa)



Nota: Elaboración propia.

La curva de malla valorada inferida muestra la distribución relativa de los valores metálicos en función del tamaño de partícula. Se observa que la mayor concentración de cobre y plata se encuentra en las fracciones más finas del mineral, lo cual es consistente con los resultados de flotación obtenidos. Este comportamiento evidencia que la liberación de los minerales valiosos ocurre predominantemente a tamaños de partícula menores, favoreciendo su recuperación metalúrgica.

4.1.5. Desarrollo del diseño factorial

Las pruebas metalúrgicas de flotación se realizaron siguiendo un diseño factorial de experimentos de dos niveles, con dos factores y dos repeticiones. En este análisis se seleccionaron como variables independientes la dosificación del xantato isopropílico de

sodio y la granulometría del concentrado, con el propósito de analizar su efecto sobre las variables de respuesta: la recuperación de cobre y plata. La Tabla 11 muestra los valores mínimo y máximo establecidos para cada variable, mientras que la Tabla 12 presenta el diseño factorial utilizado para planificar las pruebas de flotación metalúrgica.

Tabla 11

Valores mínimos y máximos de las variables para la flotación de cobre-plata

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Granulometría	65.57	73.67
Xantato isopropílico de sodio	30	50

Nota: Elaboración propia.

Tabla 12

Diseño factorial elaborado para desarrollar las pruebas de flotación de cobre-plata

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Granulometría	Z-11
1	1	1	1	65.57	30
2	2	1	1	73.67	30
3	3	1	1	65.57	50
4	4	1	1	73.67	50
5	5	1	1	65.57	30
6	6	1	1	73.67	30
7	7	1	1	65.57	50
8	8	1	1	73.67	50

Nota: Elaboración propia.

4.1.5.1. Desarrollo experimental del diseño factorial para la flotación de cobre-plata

Las pruebas de flotación se llevaron a cabo aplicando un diseño factorial 2x2 con sus respectivas réplicas, considerando como variables principales la dosificación del xantato isopropílico de sodio y la granulometría del mineral. El objetivo de estas pruebas fue evaluar los porcentajes de recuperación de cobre y plata. Todas las pruebas metalúrgicas se realizaron conforme al orden experimental definido en la Tabla 12. Los resultados obtenidos se encuentran sintetizados en los balances metalúrgicos presentados en las Tablas 13 a 20.

Tabla 13

Balance metalúrgico. Primera prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una granulometría de 65.57% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	123.4	12.34	14.00	13.45	17.28	16.60	93.81	87.12	8.10
Relave	876.6	87.66	0.13	0.28	1.14	2.45	6.19	12.88	
Cabeza calculada			1.84	1.91	18.42	19.05			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 14

Balance metalúrgico. Segunda prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	99	9.9	18.00	17.45	17.82	17.28	95.19	88.47	10.10
Relave	901	90.1	0.10	0.25	0.90	2.25	4.81	11.53	
Cabeza calculada			1.87	1.95	18.72	19.53			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 15

Balance metalúrgico. Tercera prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 65.57% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	74.5	7.45	24.00	21.42	17.88	15.96	95.55	89.14	13.42
Relave	925.5	92.55	0.09	0.21	0.83	1.94	4.45	10.86	
Cabeza calculada			1.87	1.79	18.71	17.90			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 16

Balance metalúrgico. Cuarta prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	50	5	36.00	25.72	18.00	12.86	97.30	90.02	20.00
Relave	950	95	0.05	0.15	0.50	1.43	2.70	9.98	
Cabeza calculada			1.85	1.43	18.50	14.29			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 17

Balance metalúrgico. Quinta prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una granulometría de 65.57% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	125.6	12.56	13.97	13.55	17.55	17.02	93.92	88.22	7.96
Relave	874.4	87.44	0.13	0.26	1.14	2.27	6.08	11.78	
Cabeza calculada			1.87	1.93	18.68	19.29			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 18

Balance metalúrgico. Sexta prueba de flotación , utilizando Z-11 (30 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	96.3	9.63	18.10	17.55	17.43	16.90	95.54	88.63	10.38
Relave	903.7	90.37	0.09	0.24	0.81	2.17	4.46	11.37	
Cabeza calculada			1.82	1.91	18.24	19.07			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 19

Balance metalúrgico. Séptima prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 65.57% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	78	7.8	24.01	21.56	18.73	16.82	96.21	89.68	12.82
Relave	922	92.2	0.08	0.21	0.74	1.94	3.79	10.32	
Cabeza calculada			1.95	1.88	19.47	18.75			

Nota: Elaboración propia.

Tabla 20

Balance metalúrgico. Octava prueba de flotación , utilizando Z-11 (50 g/TM) con una granulometría de 73.67% - 200 malla

Componentes	Peso (g)	Peso (%)	Ley (%)		Contenido fino		Recuperación %		Ratio
			Cu	Ag (Oz/Tc)	Cu	Ag	Cu	Ag	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Cu	53.2	5.32	35.01	26.01	18.63	13.84	99.49	93.00	18.80
Relave	946.8	94.68	0.01	0.11	0.09	1.04	0.51	7.00	
Cabeza calculada			1.87	1.49	18.72	14.88			

Nota: Elaboración propia.

4.1.5.2. Composición química de relaves

La composición química de los relaves fue determinada a partir de los balances metalúrgicos, evidenciando bajas concentraciones de cobre y plata, lo que confirma la eficiencia del proceso de flotación. Los valores obtenidos indican pérdidas mínimas de metal valioso hacia el relave, validando el desempeño del proceso.

4.1.5.3. Análisis de varianza para la flotación cobre-plata

En la Tabla 21 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) realizado mediante el software Minitab 19, correspondiente al proceso de flotación de cobre y plata. Por otro lado, la Tabla 22 muestra los coeficientes de correlación obtenidos a partir del diseño factorial aplicado. Para evaluar la influencia de las variables independientes dosificación de xantato isopropílico de sodio y granulometría. Se utilizó un diagrama de Pareto de efectos estandarizados, el cual se encuentra representado en la Figura 9.

Tabla 21*Análisis de varianza en la recuperación de cobre-plata en el proceso de flotación*

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	21.3012	88.81%	21.3012	7.1004	10.59	0.023
Lineal	2	20.7861	86.67%	20.7861	10.3931	15.49	0.013
Granulometría	1	12.726	53.06%	12.726	12.726	18.97	0.012
Xantato	1	8.0601	33.61%	8.0601	8.0601	12.02	0.026
isopropílico de sodio							
Interacciones	1	0.5151	2.15%	0.5151	0.5151	0.77	0.43
de 2 términos							
Granulometría	1	0.5151	2.15%	0.5151	0.5151	0.77	0.43
*(Xantato							
isopropílico							
de sodio)							
Error	4	5.2038	24.28%	5.2038	0.6708		
Total		7 21.4332	100.00%				

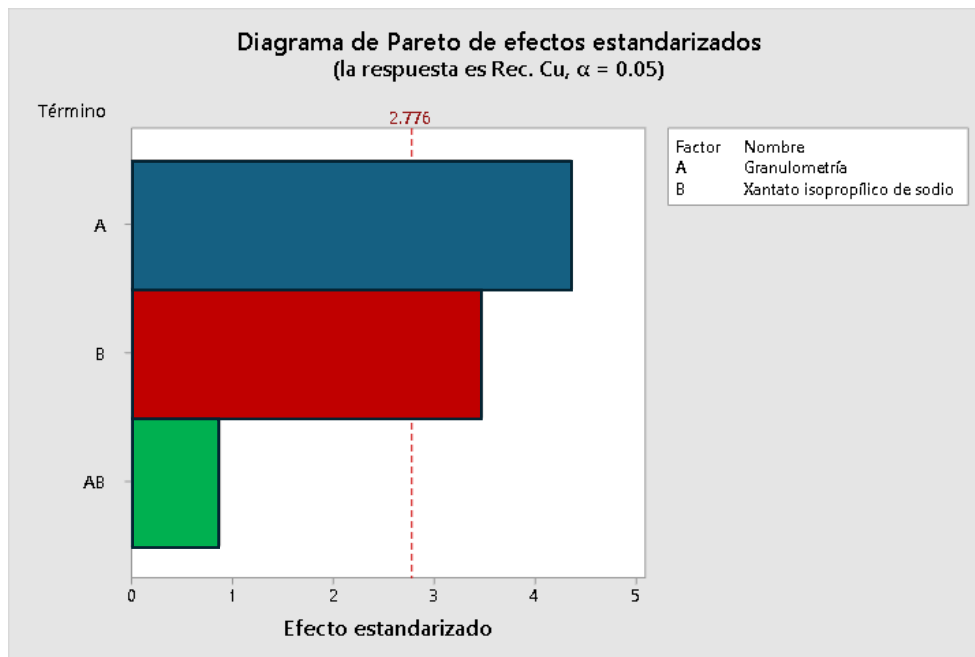
Nota: Datos extraídos del software Minitab 19.**Tabla 22***Resumen del diseño factorial-pruebas de flotación cobre-plata por el proceso de flotación*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.819016	88.81%	80.42%	10.7326	55.25%	53.96	24.36

Nota: Datos proporcionados por Minitab 19.

Figura 9

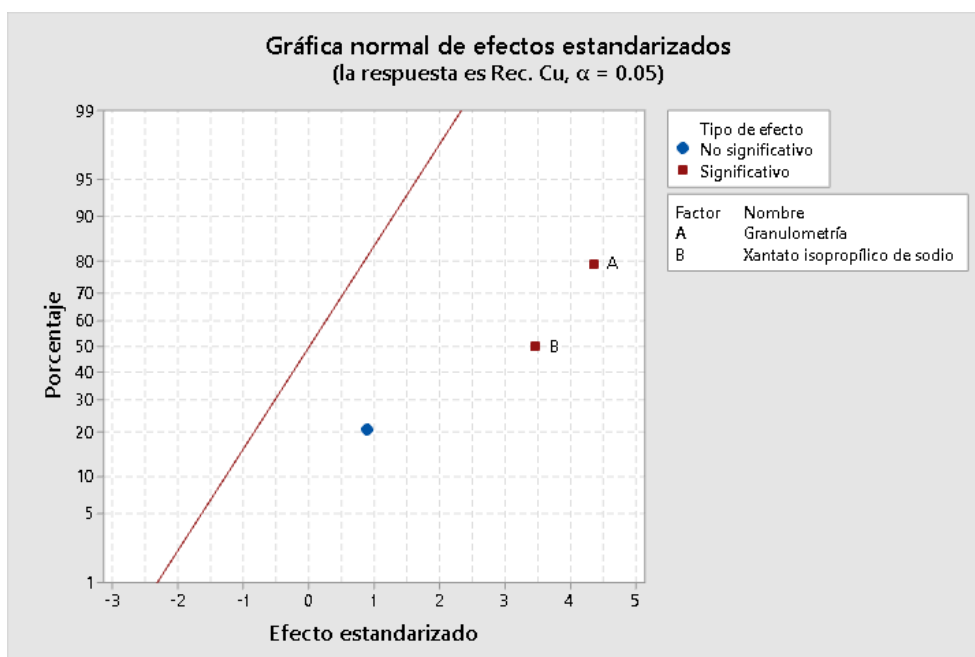
Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



Nota: Gráfica extraída del software Minitab 19. Se asignaron colores diferenciados a cada variable para facilitar la interpretación visual de los efectos estandarizados: granulometría (azul), dosificación de colector Z-11 (rojo) e interacción (verde).

Figura 10

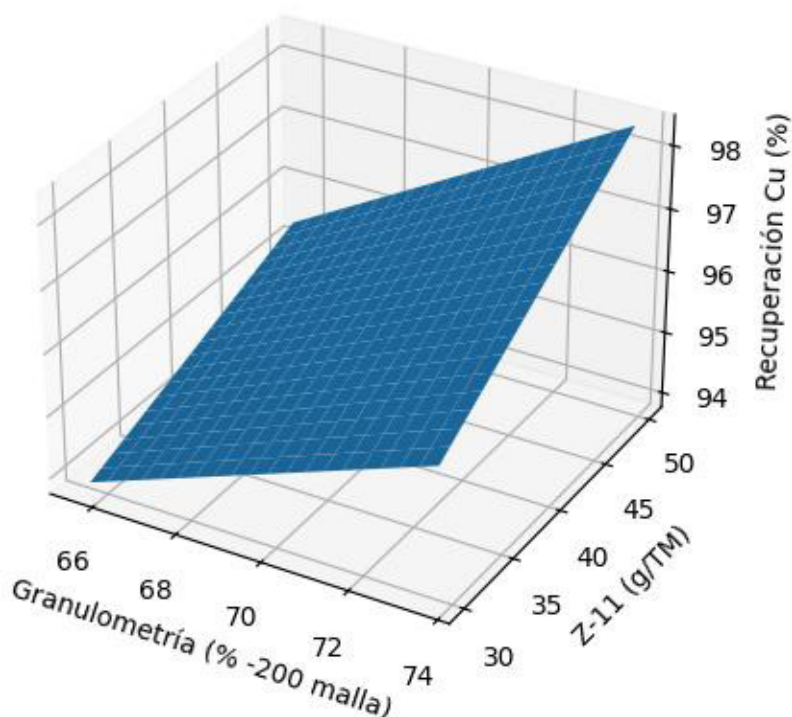
Gráfica normal de efectos estandarizados



Nota: Gráfica extraída del software Minitab 19.

Figura 11

GRÁFICO 3D (ANOVA / Superficie de respuesta para la recuperación de cobre en función de la granulometría y la dosificación del colector Z-11)



Nota: Gráfica extraída del software Minitab 19.

La gráfica de superficie de respuesta muestra el comportamiento de la recuperación de cobre en función de las variables granulometría y dosificación del colector. Se observa que las mayores recuperaciones se alcanzan a granulometrías más finas y mayores dosificaciones de colector, evidenciando la influencia significativa de ambas variables dentro del dominio experimental evaluado.

4.1.5.4. Ecuación de regresión para la flotación de cobre-plata en unidades no codificadas

Se plantea un modelo matemático que describe el proceso de flotación de cobre y plata en función de las variables independientes consideradas en el sistema. Dicho modelo permite evaluar cuantitativamente el efecto de la dosificación del colector Z-11 y de la granulometría del mineral sobre la eficiencia del proceso, conforme a la expresión matemática correspondiente.

Ecuaciones de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Recuperación Cu} &= 87.6 + 0.061 \text{ Granulometría} - 0.336 \text{ Xantato isopropílico de} \\ &\text{sodio} \\ &+ 0.00627 \text{ Granulometría} * \text{Xantato isopropílico de sodio} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Recuperación Ag} &= 87.1 - 0.011 \text{ Granulometría} - 0.450 \text{ Xantato isopropílico de} \\ &\text{sodio} \\ &+ 0.00753 \text{ Granulometría} * \text{Xantato isopropílico de sodio} \end{aligned}$$

4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.2.1. Análisis mineralógico

El análisis mineralógico realizado mediante microscopía óptica de luz reflejada permitió identificar una amplia variedad de minerales valiosos y de ganga presentes en la muestra proveniente de Huaraz. La pirita fue el mineral metálico más abundante (11.09 %), seguido por la esfalerita (1.57 %) y la calcopirita (0.66 %), lo que indica la presencia significativa de sulfuros metálicos.

En cuanto a los minerales preciosos, se identificó una baja proporción de oro (0.26 %), electrum (0.03 %), argentita (0.16 %), petzita (0.12 %) y silvanita (0.02 %). Sin embargo, a pesar de su bajo volumen, estos minerales tienen alto valor económico y requieren atención especial para su recuperación.

El grado de liberación es un aspecto crítico para la flotación. La pirita mostró un alto nivel de liberación (94.73 %), mientras que minerales valiosos como electrum, petzita, silvanita, rutilo y goethita mostraron 0 % de liberación, lo cual limita su recuperación por métodos convencionales de concentración. El oro presentó un grado de liberación del 49.38 %, lo cual sugiere que cerca de la mitad del oro podría recuperarse eficientemente por flotación directa.

Los minerales más entrelazados con ganga fueron el electrum y la silvanita, con tipos de enlace 1eI y 4cI, clasificados como muy difíciles a imposibles de liberar, lo que implica un desafío significativo para su recuperación, incluso con molienda fina o métodos de concentración intensiva.

4.2.2. Análisis químico del mineral de cabeza

El análisis químico del mineral de cabeza arrojó 1.57 Oz/Tc de plata y para el cobre fue de 1.85 %.

Estos valores indican un contenido económico interesante tanto en plata como en cobre, justificando la aplicación de procesos de concentración como la flotación. La presencia de plata en forma de sulfuros y telururos complica su recuperación directa, por lo que el diseño del proceso debe estar orientado a maximizar la selectividad y la liberación previa.

4.2.3. Resultados de flotación de cobre-plata

Se realizaron ocho pruebas metalúrgicas bajo un diseño factorial 2x2 con réplicas, variando:

Granulometría: 65.57 % y 73.67 % malla -200 y xantato isopropílico de sodio: 30 g/TM y 50 g/TM.

Obteniendo las principales observaciones:

- La recuperación de cobre alcanzó hasta 99.49 % en la prueba con granulometría fina (73.67 %) y mayor dosificación de colector (50 g/TM).
- La recuperación de plata alcanzó hasta 93.00 % en las mismas condiciones.

Las pruebas con granulometría más fina y mayor dosis de colector obtuvieron concentrados con leyes más altas y mejores recuperaciones, indicando una fuerte influencia de ambas variables en la eficiencia del proceso.

Sin embargo, también se observó una disminución del peso del concentrado con estas condiciones, lo cual es positivo en términos de concentración de valores, pero podría requerir más energía en molienda y mayor consumo de reactivos.

4.2.4. Análisis estadístico (Diseño factorial y ANOVA)

Resultados del ANOVA (Tabla 21):

- El modelo fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$), explicando el 88.81 % de la variabilidad total (R-cuadrado).
- Granulometría fue el factor más influyente (53.06 % de contribución), seguido del xantato isopropílico (33.61 %).

- La interacción entre factores no fue significativa ($p = 0.43$), lo cual indica que su efecto combinado no tiene un impacto sustancial en las recuperaciones.

Para los resultados de las ecuaciones de regresión tanto para cobre y como para la plata, estos modelos nos indican que:

- A mayor granulometría (es decir, molienda más fina), la recuperación de cobre mejora ligeramente, pero en el caso de plata, el efecto es casi neutro o incluso levemente negativo.
- A mayor dosificación de xantato, las recuperaciones disminuyen. Esto sugiere un posible efecto negativo del exceso de colector, probablemente debido a fenómenos de adsorción no selectiva, lo que genera arrastre de ganga.

En la Figura 9 (Pareto de efectos): Los factores significativos se confirmaron como granulometría y xantato, mientras que su interacción no supera el umbral de significancia. Esto coincide con el ANOVA y respalda que el diseño factorial fue bien planteado y ejecutado.

La flotación de cobre y plata en este mineral es técnicamente viable, alcanzando recuperaciones mayores al 95 % para Cu y al 93 % para Ag en condiciones óptimas.

El diseño factorial permitió identificar que el mayor efecto positivo lo tiene una molienda más fina (73.67 % -200 malla), mientras que el exceso de colector puede ser contraproducente, especialmente para la recuperación de plata.

A pesar de las buenas recuperaciones, algunos minerales valiosos como electrum, petzita, silvanita y goethita, no se liberan adecuadamente, por lo que probablemente se pierden en los relaves. Esto indica la necesidad de evaluar procesos complementarios como lixiviación de relaves o tostación para recuperar estos valores.

4.3. Prueba/ Comprobación de hipótesis

Con el objetivo de evaluar la influencia de las variables independientes: granulometría del mineral y dosificación de xantato isopropílico de sodio (Z-11) sobre las recuperaciones metalúrgicas de cobre y plata, se realizó un diseño factorial 2^2 con dos repeticiones por tratamiento. A partir de los resultados obtenidos se plantearon las siguientes hipótesis estadísticas:

4.3.1. Hipótesis para la recuperación de cobre

Hipótesis nula (H_0):

Ninguna de las variables (granulometría, dosificación de xantato Z-11) ni su interacción tienen efecto significativo sobre la recuperación de cobre.

Hipótesis alternativa (H_1):

Al menos una de las variables o su interacción tiene un efecto significativo sobre la recuperación de cobre.

Tabla 23

Resultados del ANOVA para el cobre

Fuente	Valor-p
Granulometría	0.012
Xantato isopropílico de sodio	0.026
Interacción	0.43

Nota: Elaboración propia.

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Análisis:

La granulometría tiene un valor $p = 0.012 < 0.05$, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que sí tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la recuperación de cobre.

La dosificación de Z-11 también tiene un valor $p = 0.026 < 0.05$, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que también afecta significativamente la recuperación de cobre.

La interacción entre granulometría y dosificación de Z-11 no es significativa ($p = 0.43 > 0.05$), por lo que se acepta la hipótesis nula respecto a la interacción.

Tanto la granulometría como la dosificación del colector Z-11 tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la recuperación de cobre. La interacción entre estas variables no presenta un efecto significativo en este caso.

4.3.2. Hipótesis para la recuperación de plata

Hipótesis nula (H_0):

Ninguna de las variables (granulometría, dosificación de xantato Z-11) ni su interacción tienen efecto significativo sobre la recuperación de plata.

Hipótesis alternativa (H_1):

Al menos una de las variables o su interacción tiene un efecto significativo sobre la recuperación de plata.

Resultados indirectos del ANOVA para la plata:

No se proporciona una tabla de ANOVA específica para la plata, pero se indica que los coeficientes de regresión y el modelo predictivo presentan:

- R-cuadrado ajustado = 80.42%
- R-cuadrado predicho = 55.25%

AICc y BIC bajos, lo que indica un buen ajuste del modelo. Además, en la ecuación de regresión para la recuperación de plata:

$$\text{Recuperación Ag} = 87.1 - 0.011 \text{ Granulometría} - 0.450 \text{ Z-11} + 0.00753 \text{ Granulometría} * \text{Z-11}$$

Se observa que:

El coeficiente del xantato Z-11 es relativamente alto (-0.450), lo que sugiere una influencia considerable. El efecto de la granulometría es pequeño (-0.011), y podría no ser estadísticamente significativo.

La interacción tiene un valor bajo (0.00753), posiblemente no significativo.

Entonces para la plata, se puede inferir tentativamente que la dosificación del xantato Z-11 sí tiene un efecto importante sobre la recuperación de plata, mientras que la granulometría y la interacción tienen un impacto menor.

La comprobación de hipótesis

De acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA), se obtuvo un valor $p = 0.012$ para la granulometría y $p = 0.026$ para la dosificación del colector Z-11, ambos menores al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que tanto la granulometría de molienda como la dosificación del reactivo colector influyen significativamente en la recuperación de cobre durante el proceso de flotación.

Sin embargo, la interacción entre ambas variables presentó un valor $p = 0.43$, superior a 0.05, lo que indica que no existe un efecto significativo de interacción entre la granulometría y la dosificación de Z-11.

- La granulometría explica el 53.06 % de la variabilidad.
- El colector explica el 33.61 %.
- La interacción solo 2.15 % (no significativa).
- $R^2 = 88.81\%$ → el modelo explica muy bien el comportamiento del sistema.

4.3.3. Evaluación técnico-económica del proceso

Desde el punto de vista económico, la optimización del proceso de flotación permitió incrementar la recuperación de cobre y plata, generando un mayor valor en el concentrado final. Asimismo, la reducción del consumo del colector Z-11 de 50 g/TM a 30 g/TM representa una disminución del 40 % en el uso de reactivos, lo que implica una reducción significativa en los costos operativos.

En este contexto, se determinó que operar con una dosificación de 30 g/TM permite mantener recuperaciones metalúrgicas satisfactorias (>90 % para Cu y >85 % para Ag), optimizando la relación costo-beneficio del proceso.

CONCLUSIONES

- Se comprobó la hipótesis general de la investigación, demostrando que la granulometría de molienda y la dosificación del colector Z-11 influyen significativamente en la recuperación de cobre en el proceso de flotación. Asimismo, se validaron las hipótesis específicas relacionadas con el efecto individual de ambas variables, mientras que la interacción entre ellas no presentó significancia estadística dentro del rango de estudio.
- La caracterización mineralógica del mineral sulfurado proveniente de Huaraz evidenció una alta proporción de ganga (84.75 %) y una baja concentración volumétrica de minerales portadores de cobre y plata. No obstante, la presencia predominante de especies sulfuradas como calcopirita, tetrahedrita y minerales argentíferos confirma la aptitud del mineral para ser tratado mediante procesos de flotación selectiva.
- El análisis modal mostró que el 94.78 % de las partículas se encuentran libres y solo el 5.22 % permanecen entrelazadas, lo que indica un adecuado grado de liberación a la granulometría evaluada (65.57–73.67 % -200 malla). Este nivel de liberación favorece la separación selectiva y explica las altas recuperaciones metalúrgicas obtenidas experimentalmente.
- El análisis químico del mineral de cabeza, con leyes promedio de 1.85 % Cu y 1.57 oz/Tc Ag, confirma que se trata de una mena de interés económico cuya recuperación mediante flotación es técnicamente viable, considerando los valores de recuperación superiores al 95 % para cobre y superiores al 88 % para plata alcanzados en las pruebas experimentales.
- El análisis de varianza (ANOVA) demostró que tanto la granulometría ($p = 0.012$) como la dosificación del colector Z-11 ($p = 0.026$) influyen significativamente en

la recuperación de cobre ($\alpha = 0.05$), rechazándose la hipótesis nula para ambos factores. Asimismo, se determinó que la interacción entre las variables no es estadísticamente significativa ($p = 0.43$), evidenciando que los efectos actúan de manera independiente dentro del rango estudiado.

- Desde el punto de vista operativo, se determinó que la dosificación de 30 g/TM de Z-11 permite mantener recuperaciones de cobre entre 93.8 % y 95.5 % y de plata entre 87 % y 88.6 %, valores técnicamente satisfactorios. Si bien las mayores recuperaciones se obtuvieron con 50 g/TM, la diferencia porcentual no resulta proporcional al incremento del consumo de reactivo, lo que evidencia un punto de operación técnicamente eficiente a menor dosificación.
- La reducción del consumo del colector en 40 % representa una mejora en la eficiencia del uso del reactivo, lo cual implica una optimización técnico-económica del proceso, al disminuir costos operativos sin comprometer significativamente la recuperación metalúrgica dentro de los objetivos planteados (>85 %).
- Los modelos de regresión obtenidos para la recuperación de cobre y plata presentaron un coeficiente de determinación $R^2 = 88.81$ % (R^2 ajustado = 80.42 %), lo que indica que el modelo explica adecuadamente la variabilidad del proceso dentro del dominio experimental. Esto valida estadísticamente la capacidad predictiva del modelo y su aplicabilidad para la optimización del proceso de flotación cobre-plata bajo las condiciones estudiadas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda operar el circuito de molienda a una granulometría cercana a 73.67 % -200 malla, ya que este nivel presentó las mayores recuperaciones metalúrgicas de cobre (hasta 99.49 %) y plata (93.00 %) en las pruebas experimentales. Este comportamiento se sustenta en el mayor grado de liberación de los sulfuros de cobre evidenciado en el análisis mineralógico, así como en la significancia estadística demostrada por el ANOVA ($p = 0.012$), donde la granulometría explicó el 53.06 % de la variabilidad del proceso.
- Desde el punto de vista estrictamente metalúrgico, la dosificación de 50 g/TM de colector Z-11 permite alcanzar las máximas recuperaciones obtenidas en el estudio. Sin embargo, considerando que el efecto del colector fue estadísticamente significativo ($p = 0.026$) pero no presentó interacción significativa con la granulometría ($p = 0.43$), se recomienda realizar un análisis técnico-económico complementario para determinar el punto óptimo entre recuperación incremental y costo del reactivo, dado que la mejora porcentual entre 30 y 50 g/TM no es proporcional al incremento del consumo.
- Para minerales argentíferos con bajo grado de liberación, tales como electrum, petzita y silvanita, cuya liberación fue parcial o nula según el estudio modal, se recomienda evaluar etapas de remolienda selectiva o molienda más fina controlada. No obstante, esta alternativa debe analizarse considerando el posible incremento en consumo energético y generación de lamas, las cuales podrían afectar negativamente la cinética y selectividad del proceso de flotación.
- Se recomienda ampliar el estudio evaluando el efecto del pH en rangos ligeramente alcalinos (pH 8–10), dado que la química superficial de los sulfuros

de plata puede verse influenciada por las condiciones de oxidación. Asimismo, podría evaluarse la aplicación controlada de activadores o sulfidizantes como Na_2S en casos donde se identifique presencia de especies parcialmente oxidadas, con el objetivo de mejorar la recuperación de plata. Esta recomendación se plantea como línea futura de investigación, ya que el presente estudio mantuvo constante el pH en 7 para aislar el efecto de las variables principales.

- Finalmente, se recomienda validar el modelo de regresión obtenido ($R^2 = 88.81\%$) a nivel piloto o en condiciones semi-industriales, con el fin de confirmar su aplicabilidad fuera del dominio experimental de laboratorio y fortalecer la escalabilidad del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acha, M. Z. M. (2020). *Diseño de un sistema de control predictivo generalizado multivariable para el control de siete niveles de pulpa de un banco de celdas de flotación de minerales de cobre de una planta de procesamiento de minerales* (Master's thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru)). <https://search.proquest.com/openview/cb299b4fa5cb47ed97e2224d02e41039/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Allan, G. C., & Woodcock, J. T. (2001). *Mineral processing: gold recovery*. In M. C. Fuerstenau (Ed.), *Encyclopedia of materials: Science and technology* (pp. 1–12). Elsevier.
- Arasavelli, S., et al. (2023). *Advancements in sulfide mineral flotation: A review of reagent chemistry and surface interaction mechanisms*. *Minerals Engineering*, 194, 108012.
- Arce, V. A. A., Mera, P. A. A., Hidalgo, M. A. S., Dominguez, C. A. M., & Pereyra, I. M. (2023). Biooxidación de minerales sulfurados argentíferos como pretratamiento para la recuperación de plata. *Rev. Inst. InvestIg. Fac. mInas metal. clenc. geogR*, 26(52), e26409. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/download/26409/20372/102854>
- Arndt, N. T. (2023). *Formation of Sediment-Hosted Stratiform Copper-Silver Deposits: New Geochemical Constraints*. *Earth-Science Reviews*, 238, 104331.
- Asillo Apaza, C. D. (2022). Evaluación de un circuito de recuperación de plomo y zinc mediante gravimetría y flotación. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/8fa675a5-ff1d-4ac5-a978-7e44fb435388>
- Asto Huamaní, C. L. (2024). Flotación experimental de minerales oxidados de cobre empleando soluciones de sulfuro de potasio en medio ácido, Nasca-2022. <https://repositorio.unica.edu.pe/items/a9fb4c66-f00f-4052-97fb-8efd58b01c17>

- Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Volume 1: Flotation of Sulfide Ores*. Elsevier.
- Bulut, G., et al. (2021).** *Investigation of the flotation behavior of copper sulfide minerals using xanthate and dicarbamate mixtures*. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(2), 145-158.
- Calle Romero, A. E. (2023). *Obtención de sulfuros de zinc de una mena polimetálica mediante flotación selectiva en la mina Cristian David, Pasaje-El Oro* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay). <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13267>
- Camus, F. (2003). *Geología de los sistemas porfiricos en Chile*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Cardenas Castro, M., & Huaman Condori, E. (2022). Optimizar la recuperación de cobre por la influencia de P80, el PH y la dosificación de reactivos de flotación en la Cia. Minera Antapaccay SA. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/6363>
- Carhuachín Rojas, K. O. (2021). Formulación de un proceso de flotación de minerales mina Servilleta–Las Lomas Piura en laboratorio de química de la Universidad Nacional de Piura. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUMP_e9db2d54534fe7e119957e7ef1f016b9
- Carvo Cuellar, K. E., & Aguirre Galindo, B. (2021). Caracterización geometalúrgica del mineral veta farallon NV 180 y los parámetros de flotación de minerales polimetálicos en la Compañía Minera Huaron SA. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8712>
- CEPAL (2020) La gobernanza del litio y el cobre en los países andinos. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams
- Craig, J. R., & Vaughan, D. J. (1994). *Ore microscopy and ore petrography* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Elorza Rodríguez, E., Salazar Hernández, M., Corona Arroyo, M. A., & Caudillo González, M. (2022). Flotación colectiva pirita-arsenopirita-oro de los residuos de

- Noche Buena, Zac., y su separación en concentrados pirita-oro y arsenopirita.
<https://ninive.uaslp.mx/xmlui/handle/i/8039>
- Fernandez Ramos, F. E. (2021). Evaluación del proceso de flotación de oro y plata en la compañía minera Tocadulomo SA.
<http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/5165>
- Figuerola, A. A., Herrera, F. J., & Cabrera, J. C. F. (2024). Estudio de Procesos en la Recuperación de Plata y Oro de Lixiviados Mediante el Uso de una Celda Electrolítica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 6451-6461.
<https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/9989>
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2003). *Principles of mineral processing*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Ganoza, J. (2023). FLOTACIÓN DE PARTÍCULAS GRUESAS DE SULFUROS DE COBRE. *Compartir*. <https://revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/flotacion-de-particulas-gruesas-de-sulfuros-de-cobre>
- Gonzales Cajahuaman, E. (2020). Influencia de minerales piriticos alterados en la flotación de Oro en la planta de beneficio María Mercedes I–Apurímac–2019.
<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2020>
- Gonzales Rivera, L. A. (2023). Tratamiento de mineral sulfurado para la recuperación de concentrados de cobre, plomo, zinc en la Empresa Administradora Cerro SAC–Pasco–2020. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/3215>
- Guerrero-Ruiz, J. C. (2021). Sociedad minera Jérez-Lanteira, Granada. Origen e historia de la planta hidráulica para la explotación del mineral de cobre en el siglo XIX. *DYNA Publishing*, 96(5), 473-477.
<http://184.168.116.25/index.php/DYNA/article/view/637>
- Guilbert, J. M., & Park, C. F. (2007). *The geology of ore deposits* (Waveland Press ed.). Long Grove, IL: Waveland Press.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. In S. G. Hagemann & P. E. Brown (Eds.), *Gold in 2000* (Vol. 13, pp. 245–277). Society of Economic Geologists.

- Henao Casas, J. G. (2023). Recuperación de oro libre y asociado a la pirita de los relaves de la minera El Roble por el método de flotación: Parte 2. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/35762>
- Henao Casas, J. G. (2023). Recuperación de oro libre y asociado a la pirita de los relaves de la minera El Roble por el método de flotación: Parte 2. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/35762>
- Herrera-Urbina, R. (2003). *Flotación de Minerales: Teoría, Práctica y Aplicaciones*. CIMM.
- Hitzman, M. W., et al. (2023).** *Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits*. Economic Geology, Special Publication 25.
- International Copper Study Group (2022) Demanda de cobre y disponibilidad a largo plazo. <https://internationalcopper.org/es/sustainable-copper/about-copper/cu-demand-long-term-availability/>
- Kesler, S. E., & Simon, A. C. (2015). *Mineral resources, economics and the environment*. Cambridge University Press.
- Laskowski, J. S. (2001). *Fundamentals of surface chemistry in flotation processes*. In Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (Eds.), *Principles of flotation* (pp. 23–48). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Leyton Arce, J. J. (2020). Caracterización mineralógica de mineral de cobre con mena principal de calcopirita en dos molinos de laboratorio. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/17328>
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts* (3rd ed.). Springer.
- Loyola Poves, F. G. (2022). Comportamiento de la sulfurización de minerales complejos de plomo-plata para su recuperación adecuada por flotación en la Compañía Minera Raura año 2021. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8859>
- Luo, H., et al. (2022). Molecular dynamics simulation and experimental study on the adsorption mechanism of xanthates on chalcopyrite surfaces. *Journal of Molecular Liquids*, 351, 118645.

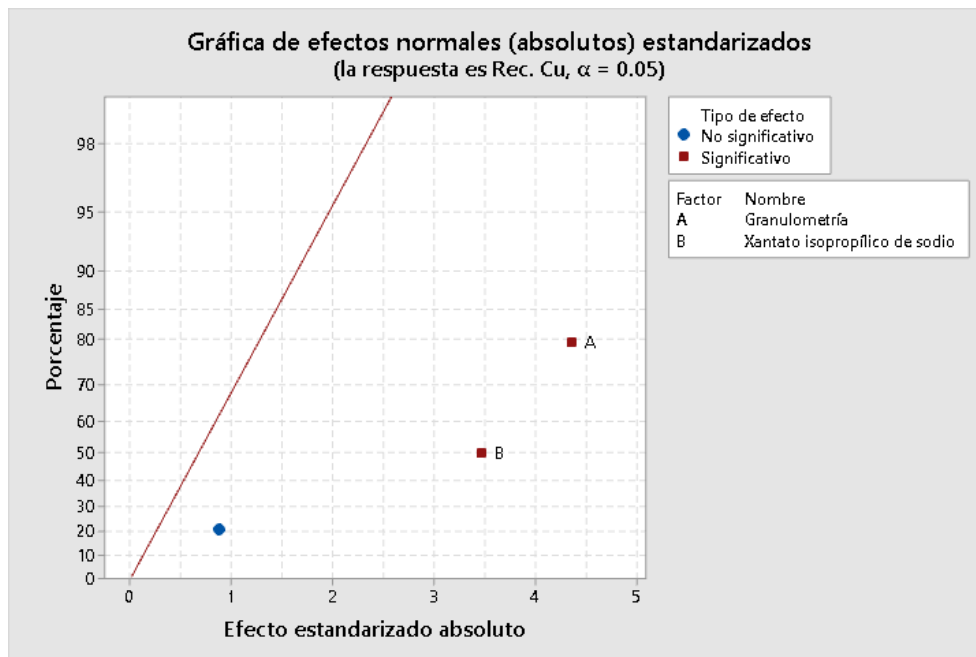
- Mining Press. (2022) (Documento) USGS: Cuáles son los países top del oro, cobre, litio, plata, cobalto y níquel global. Mining Press. Recuperado de <https://miningpress.com/nota/344443/documento-usgs-cuales-son-los-paises-top-del-oro-cobre-litio-plata-cobalto-y-niquel-global>
- Paliza Borda, T., & Quispe Ormachea, P. (2024). Optimización de la recuperación de oro por el proceso de cianuración en la planta de beneficio de la compañía minera Jerusalén SAC-Chala-Arequipa. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8653>
- Paredes, H., & Melina, D. (2023). Evaluación a nivel experimental del uso del espumante Frother 210 en la recuperación de la plata por flotación de minerales refractarios-Nasca-2022. <http://164.68.119.42/handle/20.500.13028/4598>
- Pereira, M., Ballón, E., Castro, M., Constantin, A., de Miguel, C., García, R., Glave, M., & Lanegra, I. (2022). Minería y desarrollo sostenible: seguimiento de la evaluación del desempeño ambiental del Perú. *Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/109)*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Quispe Vega, L. A. (2023) *Recuperación de minerales de cobre y cobalto a través del proceso de flotación a partir del mineral procedente de la Mina San Luis de Chulchucani* (Doctoral dissertation). <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/33642>
- Rivera Vargas, H. A. (2023). Evaluación metalúrgica para la optimización del proceso de flotación de concentrados Bulk plomo, cobre y plata en la Compañía Minera Raura mediante diseños experimentales, 2019-2022. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9643>
- Sacsi Alarcon, S. (2022). Evaluación del circuito de remolienda para la optimización de la flotación cleaner en la unidad minera Constancia. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/dbd9bae4-8758-47d2-8e19-3514f508b0b2>
- Salvo Marín, J. A. (2022). Rendimiento de nanofiltración para el tratamiento de aguas de cubetas de tranques de relaves de minería de cobre en Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192487>

- Santos Sepúlveda, J. A. (2020). *Evaluación experimental al proceso de concentración de cobre–cobalto mediante pruebas de concentración magnética y flotación de espuma a escala de laboratorio a partir de un mineral rico en magnetita–pirita–calcopirita* (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Facultad de Ingeniería). <http://dspace.utalca.cl/handle/1950/12712>
- Sapiains, P., Menzies, A., Figueroa, V., Wilke, H. G., Mille, B., Salazar, D., & Berenguer, J. (2020). Estudio arqueomineralógico de las menas de cobre prehispánicas en Collahuasi, norte de Chile. *Estudios atacameños*, (66), 83-103. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-10432020000300083&script=sci_arttext&tlng=en
- Sheng, J., et al. (2021).** *Silver enrichment in copper-rich sulfides: Insights from mineral chemistry and textural analysis of Cu-Ag deposits*. Ore Geology Reviews, 131, 104018.
- Villalta Bolomer, V. P. (2022). Análisis de la optimización de los parámetros y factores que afectan la flotación de la molibdenita en la planta de molibdeno en la concentradora Cuajone. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/15492>
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- World Silver Survey (2023) Metals Focus World Silver Survey 2023. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2023/04/World-Silver-Survey-2023.pdf>
- Zanettini, J. C. M. (2024). Recursos de minerales metalíferos. <http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/17949>
- Zou, S., et al. (2022).** *Fluid evolution and ore genesis of the stratiform Cu-Ag deposits: A review of hydrothermal and sedimentary processes*. Journal of Geochemical Exploration, 232, 106889.

Anexos

Figura 12

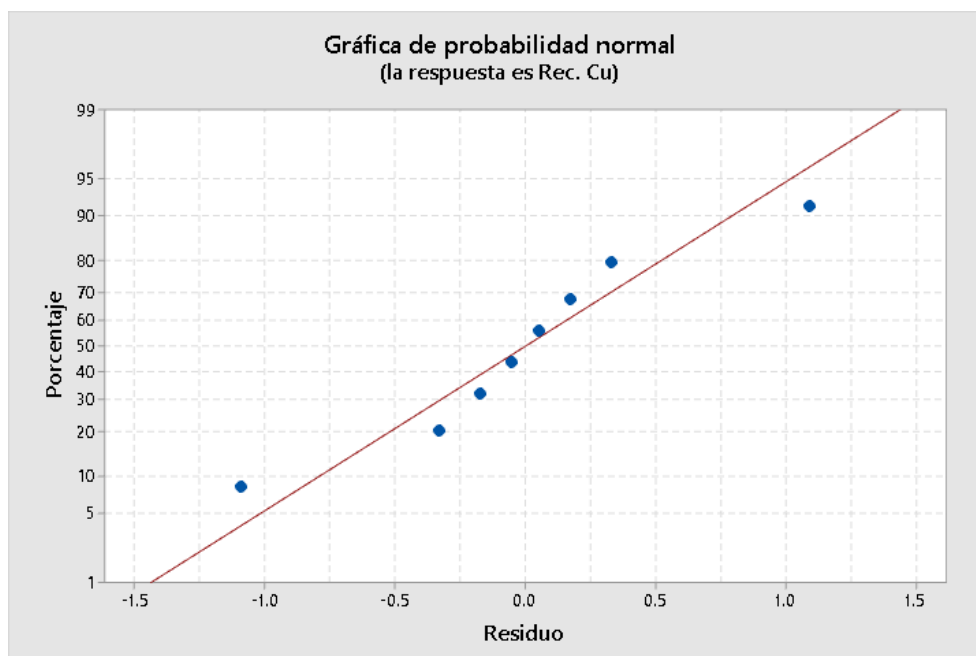
Gráfica de efectos normales estandarizados



Nota: Información obtenida de Minitab 19.

Figura 13

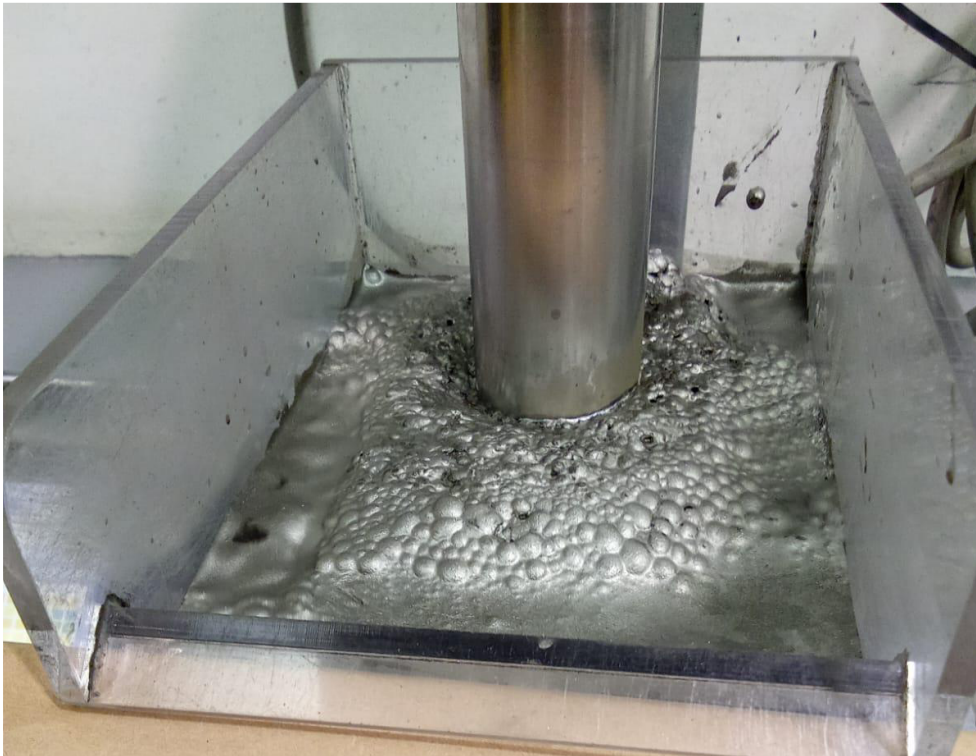
Gráfica de probabilidad normal



Nota: Información obtenida de Minitab 19.

Figura 14

Fotografía de la flotación cobre-plata



Nota: Imagen de la celda de flotación donde se realizaron las pruebas.

Figura 15

Espumas de la flotación que arrastran el concentrado de Cu-Ag



Nota: Imagen de la celda de flotación donde se realizaron las pruebas.

SEGURIDAD

Medidas de seguridad en el manejo de reactivos

Durante el desarrollo experimental se aplicaron medidas de seguridad para el manejo de reactivos como xantatos y MIBC. Se utilizó equipo de protección personal (EPP), incluyendo guantes, lentes de seguridad y mascarillas.

Los xantatos fueron manipulados evitando la exposición directa e inhalación, mientras que el MIBC, por ser inflamable, fue almacenado en ambientes ventilados y alejados de fuentes de ignición.

Asimismo, se siguieron protocolos de laboratorio para el manejo, almacenamiento y disposición de sustancias químicas.

LABORATORIOS

Laboratorios y equipos utilizados

Los análisis mineralógicos fueron realizados en el laboratorio de microscopía óptica, utilizando microscopía de luz reflejada.

Los análisis químicos se efectuaron mediante espectrometría de absorción atómica (AAS) y ensayo al fuego para plata.

Las pruebas metalúrgicas de flotación se desarrollaron en un laboratorio de procesamiento de minerales utilizando una celda de flotación tipo Denver y un molino de bolas de laboratorio.

Tabla 24

Matriz de consistencia

“RECUPERACIÓN DE COBRE CON CONTENIDO DE PLATA DE MINERALES SULFURADOS MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN HUARAZ – ANCASH”				
Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
P. General:	O. General:	H. General:	V. Independientes:	Tipo: Aplicada
¿Cómo influyen la granulometría de molienda y la dosificación del colector Z-11 en la recuperación metalúrgica de Cu y Ag, para incrementar la recuperación del 80% a valores >85% en Huaraz?	Recuperar Cu y Ag a partir de minerales sulfurados evaluando la granulometría y el consumo del colector Z-11 mediante flotación en Huaraz.	La variación del P80 y la dosificación del colector Z-11 influyen significativamente en la recuperación de Cu y Ag, permitiendo alcanzar valores superiores al 85%.	1. Granulometría (P80). 2. Dosificación de Colector Z-11 (g/t). V. Dependientes: 1. Recuperación metalúrgica de Cu y Ag (%). 2. Ley del concentrado.	Nivel: Descriptivo - Correlacional Diseño: Experimental (Factorial)
P. Específico 1:	O. Específico 1:	H. Específica 1:	V. Intervinientes:	Población:
¿De qué manera la granulometría (P80) influye en la recuperación de Cu y Ag?	Analizar el efecto de la variación de la granulometría (P80) en la respuesta metalúrgica para identificar el tamaño de liberación óptimo.	La reducción del P80 hasta el tamaño de liberación ($\approx 80\%$) incrementa significativamente la recuperación de Cu y Ag.	- pH de pulpa. - % de Sólidos. - Tiempo de flotación. - RPM de celda.	Minerales sulfurados de la zona de Huaraz.
P. Específico 2:	O. Específico 2:	H. Específica 2:	Indicadores:	Muestra:
¿Cómo afecta la variación del consumo del colector Z-11 en la recuperación de Cu y Ag?	Cuantificar la incidencia del consumo del colector Z-11 en la recuperación de Cu y Ag mediante un diseño experimental factorial.	El incremento controlado del colector Z-11 mejora significativamente la recuperación de Cu con contenido de plata.	- Micras (μm). - Gramos por tonelada (g/t). - Unidades de pH.	Muestras representativas de mineral sulfurado para pruebas de laboratorio.
P. Específico 3:	O. Específico 3:	H. Específica 3:	Instrumentos:	Técnicas:
¿De qué manera los resultados de las pruebas a nivel laboratorio permiten la recuperación de Cu y Ag?	Optimizar los parámetros operacionales de granulometría y dosificación de colector para maximizar la recuperación metalúrgica por encima del 85%.	La optimización de las condiciones operativas en flotación maximiza la recuperación de minerales sulfurados	- Análisis químico. - Microscopía (Secciones pulidas). - Celdas de flotación.	- Muestreo. - Flotación Rougher. - Análisis granulométrico.
