

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS:

**Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de
zinc en la planta concentradora San Jerónimo - Ayacucho**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

Bach. Joel Renzo SULCA CERDA

ASESOR:

Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA

COASESOR:

Mg. Hans Luciano CAYO GONZALES

AYACUCHO - PERÚ

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Lucio Sulca Canchari y Maruja Cerda Rayme, cuyo esfuerzo, guía y dedicación han sido fundamentales en cada etapa de mi formación académica y personal. Su ejemplo de perseverancia, compromiso y fortaleza ha inspirado profundamente mi camino. Extiendo también mi agradecimiento a toda mi familia, por su apoyo, comprensión y motivación constante. A todos ellos, expreso mi más sincera gratitud y reconocimiento.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a la empresa Catalina Huanca S.A.C., por abrirme las puertas de la Planta Concentradora San Jerónimo y brindarme todas las facilidades necesarias para la realización de mis prácticas profesionales y la ejecución de los ensayos metalúrgicos que hicieron posible esta investigación. Haber contado con sus instalaciones, su infraestructura y su confianza significó un paso determinante en mi formación profesional y en el desarrollo del presente estudio sobre las condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc.

Mi especial gratitud a mi asesor Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA y a mi coasesor Mg. Hans Luciano CAYO GONZALES, quienes me guiaron con paciencia, exigencia académica y una visión técnica que enriqueció cada etapa del trabajo. Sus orientaciones, observaciones y dedicación fueron un pilar fundamental para alcanzar la solidez metodológica y el rigor científico que esta tesis requiere.

Extiendo también mi agradecimiento al Superintendente de Planta Concentradora, al ingeniero Alberto PALOMINO FLOR y a la ingeniera metalurgista Ely ZUÑIGA ZUÑIGA por su apoyo constante dentro de la planta, por compartir su experiencia operativa y orientarme en la interpretación de los resultados metalúrgicos. Su acompañamiento fortaleció mi comprensión de los procesos de flotación y del comportamiento del mineral en condiciones reales de operación.

Finalmente, reconozco de manera especial a Julver QUISPE NOA, cuyo compromiso y apoyo directo en la realización de los ensayos metalúrgicos hicieron posible la obtención de datos confiables y representativos. Su colaboración en las tareas más demandantes del trabajo experimental fue clave para culminar este proyecto.

A cada uno de ustedes, gracias por creer en este trabajo y por contribuir, desde su ámbito, a mi crecimiento profesional y personal. Esta tesis es también resultado de su esfuerzo, dedicación y confianza.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar la flotación diferencial de un mineral complejo de zinc con características refractarias, proveniente de la mina hacia la Planta Concentradora San Jerónimo, el cual presenta elevados contenidos de hierro y otras impurezas que dificultan la selectividad del proceso. En una etapa inicial se realizaron las caracterizaciones mineralógicas y físicas mediante análisis químico e identificación visual, determinándose como principales minerales de mena a la pirita, marmatita y galena. La ley de cabeza del mineral fue de 11,11 % Zn, 25,74 % Fe. Asimismo, se evaluaron tres tiempos de molienda para establecer una granulometría óptima de liberación, definiéndose un P80 de 160 μm .

La investigación se desarrolló bajo una metodología aplicada, de nivel explicativo y enfoque cuantitativo, empleando un Diseño Experimental Hexagonal basado en la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), con el fin de modelar y optimizar la respuesta metalúrgica. Se analizaron 8 pruebas experimentales, considerando como variables independientes la dosificación de cianuro de sodio (NaCN), utilizado como depresor de minerales de hierro, y sulfato de cobre (CuSO_4), empleado como activador de la esfalerita. Las variables operativas, tales como el pH (11) y la granulometría, se mantuvieron constantes durante los ensayos.

El análisis estadístico evidenció que el modelo ajustado para la recuperación de zinc fue altamente significativo, con un coeficiente de determinación ajustado de 95,29 %, lo que permitió una optimización confiable del proceso. Las condiciones óptimas determinadas fueron una dosificación de 18,88 g/t de NaCN y 481,88 g/t de CuSO_4 , bajo las cuales se predijo una recuperación máxima de zinc de 91,39 %, con una recuperación de hierro en el concentrado de 9,29 %.

Se concluyó que ambas variables presentan un efecto cuadrático significativo sobre la recuperación del zinc. La sobredosificación de NaCN incrementa la recuperación de hierro, reduciendo la selectividad del proceso, mientras que la sobreactivación con CuSO_4 provoca la activación de la ganga y pérdidas de zinc en el relave. Por tanto, el control preciso de la dosificación de estos reactivos resulta determinante para mejorar el rendimiento metalúrgico y la calidad del concentrado final.

Palabras clave: cianuro de sodio, esfalerita, flotación de minerales, optimización, sulfato de cobre.

Abstract

This study aimed to optimize the differential flotation of a complex refractory zinc ore from the San Jerónimo Concentrator Plant, characterized by high iron content and other impurities that hinder process selectivity. Initially, mineralogical and physical characterizations were conducted through chemical analysis and visual identification, revealing pyrite, marmatite, and galena as the main ore minerals. The ore grade was 11,11% Zn and 25,74% Fe. Three grinding times were evaluated to determine the optimal liberation particle size, establishing a P80 of 160 μm .

The research employed an applied, explanatory, and quantitative methodology using a Hexagonal Experimental Design based on Response Surface Methodology (RSM) to model and optimize metallurgical performance. Eight experimental tests were conducted, considering sodium cyanide (NaCN) dosage as a depressant for iron minerals and copper sulfate (CuSO_4) as an activator for sphalerite. Operational variables such as pH (11) and particle size were kept constant during the tests.

Statistical analysis showed that the fitted model for zinc recovery was highly significant, with an adjusted R^2 of 95,29%, allowing reliable process optimization. Optimal conditions were determined as 18,88 g/t NaCN and 481,88 g/t CuSO_4 , under which a maximum zinc recovery of 91,39% and iron recovery in the concentrate of 9,29% were predicted.

It was concluded that both reagents have a significant quadratic effect on zinc recovery. NaCN overdosing increases iron recovery, reducing process selectivity, while CuSO_4 overactivation promotes gangue activation and zinc losses in the tailings. Therefore, precise control of reagent dosages is critical to improving metallurgical performance and final concentrate quality.

Keywords: Sodium cyanide, Sphalerite, Mineral flotation, Optimization, Copper sulfate.

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Índice	vi
Lista de tablas	ix
Lista de figuras.....	x
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1.1. Descripción de la situación problemática	1
1.1.2. Problema General.....	2
1.1.3. Problemas Específicos.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. General	3
1.2.2. Específicos.....	3
1.3. ANTECEDENTES.....	3
1.3.1. Internacionales.....	3
1.3.2. Nacionales	5
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	8
1.5. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS.....	9
1.5.1. Hipótesis General.....	9
1.5.2. Hipótesis Específicas	9
1.6. IDENTIFICACIÓN DE LA VARIABLE	10
1.6.1. Variables Independientes	10
1.6.2. Variable dependiente	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	13
2.1. BASES TEÓRICAS.....	13

2.1.1.	Reactivos de flotación	13
2.1.2.	Modelado y simulación de la flotación	14
2.1.3.	Aspectos ambientales y de sostenibilidad para gestión de residuos y efluentes	14
2.1.4.	Normativas de regulación de prácticas de operación de plantas concentradoras en Perú	15
2.1.5.	NaCN	16
2.1.6.	CuSO ₄	17
2.1.6.1.	Mecanismo de CuSO ₄	17
2.1.7.	Pirita	18
2.1.8.	RSM	18
2.1.9.	Depresión de sulfuros de hierro	19
2.1.10.	Activación de esfalerita	19
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO		21
3.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	21
3.2.	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	22
3.3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	22
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA	23
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	23
3.6.	EQUIPOS Y MATERIALES	23
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES		27
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL Y CONDICIONES BASE	27
4.1.1.	Ley de cabeza de la muestra experimental	27
4.1.2.	Parámetros operativos constantes	28
4.2.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	32
4.2.1.	Matriz del diseño experimental	32
4.2.2.	Balances metalúrgicos completos por pruebas experimentales	33
4.3.	ANÁLISIS INTERPRETATIVO DE X1 y X2	37

4.3.1.	Efecto de X1: Cianuro de Sodio	37
4.3.2.	Efecto de X2: Sulfato de cobre.....	38
4.4.	ANÁLISIS INFERENCIAL	39
4.4.1.	Análisis del modelo para la recuperación de Zn (Recup_Zn_pct VS. NaCN_g/t; CuSO ₄ _g/t)	39
4.4.2.	Análisis del modelo para la recuperación de hierro (%) en el concentrado de Zn (Recup_Fe_pct vs NaCN_g/t: CuSO ₄ _g/t)	42
4.4.3.	Análisis de hipótesis específicas	46
4.5.	COMBINACIÓN ÓPTIMA DE X1 y X2.....	47
4.6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
	CONCLUSIONES	54
	RECOMENDACIONES	56
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	ANEXOS	63

Lista de tablas

Tabla 1	Operacionalización de las variables	11
Tabla 2	Ley de cabeza de la muestra especial.....	27
Tabla 3	Diseño experimental hexagonal y respuestas metalúrgicas.....	32
Tabla 4	Balance metalúrgico – Prueba 1 (MT-01)	33
Tabla 5	Balance metalúrgico – Prueba 2 (MT-02)	33
Tabla 6	Balance metalúrgico – Prueba 3 (MT-03)	34
Tabla 7	Balance metalúrgico – Prueba 4 (MT-04)	34
Tabla 8	Balance metalúrgico – Prueba 5 (MT-05)	35
Tabla 9	Balance metalúrgico – Prueba 6 (MT-06)	35
Tabla 10	Balance metalúrgico – Prueba 7 (MT-07)	36
Tabla 11	Balance metalúrgico – Prueba 8 (MT-08).....	36
Tabla 12	Efecto de la dosificación de NaCN	37
Tabla 13	NaCN constante en nivel bajo (14,39 g/t) en las pruebas 3 y 5	38
Tabla 14	NaCN constante en nivel alto (23,98 g/t) en las pruebas 2 y 6	38
Tabla 15	Coeficientes codificados (Recup_Zn_pct).....	39
Tabla 16	Resumen del modelo (Recup_Zn_pct)	40
Tabla 17	Análisis de Varianza (Recup_Zn_pct).....	40
Tabla 18	Coeficientes codificados (Recup_Fe_pct).....	43
Tabla 19	Resumen del modelo (Recup_Fe_pct)	43
Tabla 20	Análisis de Varianza (Recup_Fe_pct).....	44
Tabla 21	Parámetros de optimización	47
Tabla 22	Solución de mejora en la Recup_Fe_pct y Recup_Zn_pct.....	47
Tabla 23	Predicción de respuesta múltiple	47

Lista de figuras

Figura 1 Esquema de la preparación de cianuro de sodio mediante el proceso de Castner.....	16
Figura 2 Esquema de activación de esfalerita	19
Figura 3 Ubicación de la planta concentradora y laboratorio	21
Figura 4 Vista aérea de la planta concentradora y laboratorio	22
Figura 4 Cinética de molienda Vs tiempo	28
Figura 5 Perfil granulométrico.....	29
Figura 6 Esquema de flotación Bulk y Zn	31
Figura 7 Pareto de efectos secundarios (Recup_Zn_pct)	41
Figura 8 Gráficas de residuos (Recup_Zn_pct)	42
Figura 9 Pareto de efectos secundarios (Recup_Fe_pct)	45
Figura 10 Gráficas de residuos (Recup_Fe_pct)	46
Figura 11 Gráfico de optimización (Recup_Zn_pct y Recup_Fe_pct)	48

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Descripción de la situación problemática

En el contexto global actual, la industria minera enfrenta desafíos significativos para mantener la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la demanda de minerales sigue en aumento debido al crecimiento industrial, lo que ejerce una presión constante sobre las operaciones mineras para aumentar su producción y eficiencia (Zárate et al., 2020). A nivel mundial, el zinc se posiciona como el cuarto metal de mayor demanda global. No obstante, el agotamiento progresivo de estas reservas ha generado una brecha frente al consumo creciente, y la recuperación del Zn (Song et al., 2023). Debido a la complejidad de los minerales de óxido de zinc y la similitud en las propiedades de superficie entre los minerales deseados y los no deseados (Aramburú et al., 2022).

En Latinoamérica, las operaciones mineras enfrentan retos, debido a la extracción y procesamiento de minerales en la región y el aprovechamiento eficiente de estos recursos se ve obstaculizado debido a la variabilidad geológica de los depósitos minerales y las limitaciones tecnológicas en las plantas concentradoras (Gachúz, 2022). Además, se estima que las tasas de recuperación de minerales que pueden ser hasta un 10% inferiores a las alcanzadas en operaciones optimizadas (García y Paucar, 2023).

En Perú, la producción nacional de zinc, en el 2021 tuvo un total de 1 533 135 toneladas métricas finas (TMF) con una variación positiva mayor que en el 2020 de 14,8%. Este valor de producción se debió en gran medida a las contribuciones de las

empresas mineras Antamina, Volcan y Nexa Resources, que representaron el 34,8%, 9,3% y 7% de la producción total de este metal. Sin embargo, en 2022, el 32,5% de la producción minera se vio afectada a nivel departamental, incluida la producción de zinc en Cerro de Pasco (Barrientos et al., 2024). Las estadísticas sugieren que, en promedio, las operaciones mineras en Perú podrían aumentar la recuperación de minerales en un 5% a 10% (Torres et al., 2021).

La instalación de la planta concentradora “San Jerónimo”, situada a una considerable distancia de Lima en el Departamento de Ayacucho, maneja una cantidad diaria de 2 300 toneladas métricas secas (TMS) de un mineral compuesto por múltiples metales. Los análisis promedio de este mineral indican una composición de 7% de zinc, 0,7% de plomo, 0,08% de cobre y 1 onza por tonelada métrica de plata. El método aplicado para la concentración de los minerales, permite una extracción de 21 TMS de un concentrado de plomo con una riqueza del 58,5% en este metal y 40 onzas de plata por tonelada métrica. Además, se produce un concentrado de zinc que alcanza las 280 TMS con una pureza del 53% de zinc. Asimismo, se destaca que la planta concentradora trabaja con una “Ley de Cabeza” con 7% de entrada, 93% de recuperación y un estándar de calidad del concentrado de Zinc del 53%.

La propuesta de implementar un estudio experimental real basado en dos reactivos (NaCN y CuSO_4) y en RSM que cumpla con los requerimientos de la planta concentradora de Ayacucho para el año 2025 representa, por lo tanto, una oportunidad estratégica para superar los desafíos operacionales y ambientales actuales. Este enfoque no solo promete mejorar la rentabilidad y eficiencia de la planta, sino que también se alinea con los objetivos de sostenibilidad y responsabilidad social empresarial, fortaleciendo el compromiso de la planta con el desarrollo sostenible de la región.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.2. Problema General

¿Cuáles son las condiciones óptimas en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca?

1.1.3. Problemas Específicos

¿Cuál es la dosificación del depresor cianuro de sodio en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca?

¿Cuál es la dosificación del sulfato de cobre en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

Determinar las condiciones óptimas en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la Planta Concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca.

1.2.2. Específicos

Determinar la dosificación óptima del depresor cianuro de sodio en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca.

Determinar la dosificación óptima del sulfato de cobre en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca.

1.3. ANTECEDENTES

1.3.1. Internacionales

Hernández et al. (2023), en México, realizaron un estudio centrado en la remoción de zinc de un efluente sintético mediante electrodiálisis. La metodología incluyó pruebas experimentales con una celda de electrodiálisis de tres compartimentos, utilizando membranas de intercambio iónico y variando parámetros como la densidad de corriente, la velocidad de recirculación y el pH. Los resultados mostraron que la eficiencia de remoción de zinc aumentó con la densidad de corriente, alcanzando un valor máximo del 95,80% a 120 A/m² en un tiempo de tratamiento de 60 minutos. Se determinó que la velocidad de recirculación también influyó significativamente, logrando una remoción superior al 90% a partir de 30 mL/min. En cuanto al pH, se encontró que el valor óptimo fue 6, permitiendo una remoción de 90,35%, mientras que valores más altos favorecieron inicialmente la precipitación química del zinc, disminuyendo la efectividad del proceso de

electrodiálisis. En conclusión, la investigación demostró que la electrodiálisis es una técnica efectiva y energéticamente eficiente para la eliminación de zinc de soluciones acuosas, logrando altas tasas de remoción en tiempos reducidos y con menor consumo de energía en comparación con estudios previos.

Sempertegui (2023), en Ecuador, realizó una investigación orientada a la recuperación de zinc a partir de polvos de acería empleando solventes eutécticos profundos (DES), específicamente relina (mezcla de urea y cloruro de colina), como agente lixivante. La metodología incluyó ensayos por tanto se enmarcó en lo experimental y desde un enfoque numérico. Los resultados demostraron que la mayor recuperación de zinc, 49,84%, se obtuvo a 90°C, seguida por un 48,85% a 60°C, mientras que a 30°C la recuperación fue significativamente menor, alcanzando solo 26,75%. En cuanto a los oxidantes, el yodo resultó ser el más efectivo, favoreciendo la disolución del zinc con una eficiencia superior al 48%. En conclusión, el estudio demostró que la relina es un solvente eutéctico viable para la lixiviación de zinc a partir de residuos siderúrgicos, aunque la eficiencia de recuperación aún es limitada en comparación con métodos convencionales. Se recomienda optimizar las condiciones operativas y explorar la combinación de DES con otros agentes lixiviantes para mejorar la extracción del metal.

Ma et al. (2021), en China, analizar relaves de la mina Wulagen (China), con una ley de zinc inferior al 1%, empleando flotación por espuma con diversos colectores catiónicos (OPA 10, OPA 1214, OPA 13 y DDA) en presencia de Na₂S. El estudio permitió jerarquizar la efectividad de las aminas, siendo la OPA 1214 la de mejor desempeño en términos de selectividad y recuperación, logrando además optimizar el consumo de agentes activadores y depresores (Na₂S y Na₂SiO₃). Los hallazgos confirman que la longitud de la cadena de hidrocarburos en las aminas potencia la asociación hidrofóbica, facilitando una adsorción selectiva sobre la smithsonita previamente sulfurada y mejorando sustancialmente los índices de flotabilidad. Se concluyó que, el incremento en la dosificación de los colectores potencia la recuperación, esto ocurre a expensas de la ley de zinc.

Wei et al. (2021), en China, realizaron un estudio enfocado en mejorar la recuperación de zinc y plomo de minerales mixtos de sulfuro-óxido a través de un nuevo proceso de flotación en condiciones de baja alcalinidad. La investigación utilizó pruebas de laboratorio y análisis cuantitativos, con un nivel explicativo. Los resultados indicaron que la recuperación total de zinc alcanzó el 84,42%, combinando

la flotación de minerales de sulfuro y óxido de zinc. A nivel industrial, se logró incrementar la recuperación operativa de zinc en el concentrado de óxidos en 19,52% en comparación con el proceso convencional. Además, el uso de un ambiente de pH reducido (pH = 9 en lugar de pH = 12) permitió disminuir el consumo de reactivos, reduciendo el costo total del proceso en 3,93 yuanes por tonelada de mineral. En conclusión, la aplicación de condiciones de flotación en baja alcalinidad y la eliminación del deslamado mejoraron significativamente la recuperación de zinc y plomo, redujeron el consumo de reactivos y minimizaron el impacto ambiental del proceso.

Du et al. (2021), en China, desarrollaron un estudio enfocado en la recuperación de zinc y plata a partir de residuos de lixiviación ácida de zinc mediante un proceso innovador de lixiviación con agua seguida de flotación. Para ello, se realizaron experimentos variando parámetros como el tiempo de molienda, la concentración de reactivos, la densidad de pulpa y el tiempo de flotación. Los resultados mostraron que, en la etapa de lixiviación con agua, la recuperación de zinc fue del 38%, mientras que la de cobre alcanzó el 61%. Posteriormente, en la etapa de flotación, se obtuvo un concentrado con 12,26% de zinc, logrando una recuperación del 42,88%. En conclusión, el estudio demostró que el método de lixiviación con agua seguido de flotación es una alternativa eficiente para la recuperación de zinc y plata de residuos industriales, permitiendo una optimización del proceso y reduciendo el impacto ambiental.

1.3.2. Nacionales

Porras (2024), en Perú, realizaron un estudio enfocado en optimizar la recuperación de zinc en la planta concentradora "Santander" mediante la evaluación del desempeño de distintos reactivos de flotación. Para ello, aplicaron un diseño de experimentos y analizaron muestras del circuito de flotación de zinc, ajustando la dosificación de colectores y depresores. Los resultados indicaron que la recuperación de zinc alcanzó un 83,78%, superando en aproximadamente 6% los valores obtenidos en pruebas previas sin optimización. Se determinó que el colector C1-5142 a una concentración de 9,8 g/tM y el colector Z-11 con una dosificación de 5,5 g/tM fueron los más efectivos en la mejora del proceso. Asimismo, se observó que una reducción en el uso de sulfato de zinc como depresor contribuyó a minimizar la activación indeseada de pirita, mejorando así la calidad del concentrado. Como conclusión, la investigación evidenció que una combinación óptima de reactivos y

ajustes en los parámetros operacionales permitió incrementar la eficiencia de recuperación de zinc, logrando un producto de mayor pureza y con menor contenido de impurezas.

Vilela y López (2023) llevaron a cabo la planificación del procedimiento para mejorar la extracción de zinc de minerales sulfurados de alta pureza mediante técnicas de flotación en la región de Áncash. Así, el estudio se enfocó en resolver este desafío, considerando que la flotación de estos minerales de alta pureza supone obstáculos significativos para los mineros de pequeña escala, enfrentándose a recuperaciones insuficientes y a la producción de concentrados de calidad no apta para la venta. La metodología de esta tesis fue de carácter experimental, empleando principios del método científico y haciendo uso de teorías de flotación junto con diseños experimentales factoriales para optimizar la extracción de zinc de minerales sulfurados de alta pureza en Áncash, adoptando además un enfoque combinado. Los hallazgos más destacados incluyen que la prueba de flotación más efectiva se logró con un agregado de 500 g de CuSO_4 por tonelada, 70 g de Z6 por tonelada, y 40 g de MIBC por tonelada, resultando en una recuperación de zinc del 98,17%, una pureza del concentrado de 41,23%, y una ratio de 3,69, según se observó en la prueba número 16. Se determinó que la única variable que influye significativamente en la pureza del concentrado de zinc es la cantidad de MIBC utilizada, contribuyendo en un 75,11% a la calidad del producto final.

García (2023) se centró en identificar la relación óptima entre la longitud y el diámetro de una columna de flotación en un entorno de laboratorio, considerando sus parámetros operacionales y evaluando como resultado el porcentaje de recuperación de zinc. La metodología fue experimental y aplicada, utilizando métodos cuantitativos y pruebas de laboratorio. A partir de la cinética de molienda, se derivó una regresión lineal con el modelo matemático $Y = 19,35 \ln X - 42,041$, que permite determinar la abertura de malla en relación con el porcentaje acumulado pasante. Este modelo se ajustó utilizando el Método de Función de Gates-Gaudin-Schumann, obteniendo una nueva regresión lineal con la ecuación $Y = 20,542 \ln(X) - 48,305$, la cual determinó una abertura de malla de 317 micras para un 70 % pasante. Como resultado, se encontró que la relación óptima L/D es 14,76, logrando una recuperación máxima de zinc del 93,14 %.

Valencia y Calle (2023) investigaron el comportamiento de una mena polimetálica mediante la evaluación de la eficacia de la flotación selectiva para

recuperar la esfalerita (sulfuro de zinc) y la franklinita (óxido de zinc). Metodológicamente fue experimental ya que se basó en el uso de maquinaria para experimentos estandarizados con el fin de medir y hacer seguimiento a los procesos químicos. Los resultados experimentales muestran que en el experimento 1, correspondiente a la concentración de esfalerita (ZnS), se obtuvo una recuperación del 99% del zinc, con un tenor de 52,3% en el concentrado final. En el experimento 2, etapa 2, enfocado en la recuperación de óxidos de zinc (franklinita - $ZnFe_2O_4$), la recuperación alcanzó el 49%, con un tenor de 25,8% en el concentrado. Además, la implementación de un circuito de flotación selectiva permitió una optimización progresiva del proceso, iniciando con la separación del sulfuro de zinc, seguida por la recuperación de sulfuros de hierro y finalizando con la obtención de óxidos de zinc a partir de las colas residuales, logrando una eficiente extracción del metal. Se concluye que es imprescindible la modificación de parámetros químicos y la exploración de opciones más respetuosas con el medio ambiente para lograr un balance óptimo entre beneficios económicos y minimización de impactos negativos tanto sociales como ambientales.

Condor y Huaman (2021) llevaron a cabo un estudio con el propósito de introducir un nuevo colector específico en el proceso de flotación de la esfalerita, con el objetivo de eliminar el uso de la Cal y otros colectores, que se empleaban previamente en la planta concentradora. Metodológicamente fue experimental, aplicado y se utilizaron métodos cuantitativos y pruebas de laboratorio. Los resultados obtenidos en el estudio muestran que la recuperación de zinc alcanzó un 96,57% utilizando el reactivo estándar, mientras que al emplear el colector Flotecc (F-4234), la recuperación se mantuvo en 96,52%, con un factor metalúrgico de 1134.21. La calidad del concentrado de zinc se situó en 54,55% con este reactivo, en comparación con el 55,55% obtenido con el reactivo estándar. Además, se determinó que el tamaño de partícula óptimo para la flotación de zinc fue de 15 μm , con una energía específica de molienda de 14,7 kWh/t, lo que permitió reducir el contenido de insolubles de 5,6% a aproximadamente 1%. En conclusión, los reactivos específicos examinados presentan una eficacia notable en la flotación de zinc, evidenciando una selectividad favorable frente a los minerales de hierro y las impurezas, lo que indica su buen desempeño y potencial para aplicaciones en la minería.

Inga (2020) planteó mejorar la eficiencia de recuperación de zinc en la segunda fase de flotación de minerales polimetálicos, donde la tasa promedio anual de recuperación de zinc se situaba en el 82%. Se obtuvieron muestras de la planta concentradora Recuperada; se tomaron muestras de mineral fresco de la faja N°01, que alimentaba la molienda primaria, y las muestras de pulpa se extrajeron de las colas de flotación bulk Pb/Ag. Durante la investigación, se llevaron a cabo pruebas preliminares de flotación para determinar las variables independientes más significativas en la recuperación de zinc, utilizando el software estadístico MINITAB. Las dosificaciones se basaron en el historial del proceso de la planta concentradora Recuperada para la flotación preliminar. Las variables más influyentes fueron seleccionadas mediante el análisis T-student del programa MINITAB, donde el tiempo de remolienda (en minutos) se identificó como la variable más significativa, seguida por el sulfato de cobre (en g/tM). Utilizando estas variables seleccionadas, se procedió a una optimización utilizando un diseño hexagonal y análisis estadístico con el software Minitab, lo que permitió encontrar el modelo de la ecuación cuadrática. Se llevaron a cabo cálculos de las derivadas parciales del modelo para identificar los óptimos de las variables estudiadas, obteniéndose como resultado una dosis óptima de sulfato de cobre de 351,06 g/tM, un óptimo de tiempo de remolienda de 5,06 minutos, y una recuperación máxima del 88%. Este análisis concluye que la optimización a través del diseño hexagonal resulta ser extremadamente valiosa debido a su eficacia y la rapidez con la que permite determinar los ajustes óptimos para la dosificación de sulfato de cobre y el tiempo de remolienda, facilitando así la mejora de los procesos.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Desde un punto de vista teórico, el estudio se basa en principios bien establecidos de la ingeniería química y de procesos, especialmente en lo que respecta a la separación de fases y la dinámica de fluidos. La flotación es un proceso complejo que involucra fenómenos interfaciales, químicos y físicos para separar selectivamente partículas minerales valiosas de la ganga. Avances recientes en la teoría de procesos de flotación para optimizar el proceso crítico, y garantizar la sostenibilidad de las operaciones mineras (Pérez et al., 2022).

Metodológicamente, involucra el diagnóstico del estado actual del proceso de flotación, y esta aproximación metodológica no solo es consistente con las prácticas contemporáneas en ingeniería de procesos, sino que también se basa en la

selectividad Zn-Fe, dosificación de NaCN/CuSO₄ y optimización mediante RSM, proporcionando un marco experimental replicable para otras operaciones mineras enfrentando desafíos similares (Arias y Covinos, 2021).

En la práctica, la optimización del proceso de flotación a través de un estudio experimental puede llevar a un aumento en la calidad y cantidad de concentrado mineral producido, reduciendo al mismo tiempo el consumo de agua y reactivos químicos. Esto no solo tiene implicaciones económicas positivas para la planta, mejorando su rentabilidad y competitividad, sino que también reduce el impacto ambiental de sus operaciones, alineándose con las regulaciones ambientales y las expectativas de sostenibilidad.

La importancia del estudio radica en su capacidad para abordar desafíos críticos en la industria minera, particularmente en un contexto donde la eficiencia operativa y la responsabilidad ambiental son cada vez más prioritarias. El estudio podría servir como un caso de referencia para la industria minera en Perú y en la región, incentivando el estudio experimental real basado en dos reactivos (NaCN y CuSO₄) y en RSM. Además, los hallazgos y metodologías del estudio tienen el potencial de contribuir a la formación académica y profesional en el campo de la ingeniería de minas y procesos minerales, fomentando el desarrollo de capacidades técnicas locales y promoviendo la investigación aplicada en la región.

1.5. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis General

Si se determina las condiciones óptimas, entonces se optimizará la recuperación de zinc en el proceso de flotación de la planta concentradora San Jerónimo.

1.5.2. Hipótesis Específicas

Si se determina la dosificación óptima del cianuro de sodio, entonces se optimizará la recuperación de zinc en el proceso de flotación de la Planta Concentradora San Jerónimo.

Si se determina la dosificación óptima del sulfato de cobre, entonces se optimizará la recuperación de zinc en el proceso de flotación de la Planta Concentradora San Jerónimo.

1.6. IDENTIFICACIÓN DE LA VARIABLE

1.6.1. Variables Independientes

- Dosificación de cianuro de sodio
- Dosificación de sulfato de cobre

1.6.2. Variable dependiente

- Recuperación de zinc en el proceso de flotación (%)

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable Dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Formula	Indicadores	Escala
Recuperación de zinc en el proceso de flotación (%)	se define como el porcentaje de la masa total de zinc presente en la alimentación que se traslada exitosamente al concentrado final, en donde se genera una interacción química con el NaCN, CuSO_4 y se controla el pH, dosificación estequiométrica y el tiempo de acondicionamiento (Inga et al., 2020)	Esta variable se medirá con el balance metalúrgico del diseño experimental que se seleccione	% de la masa total de zinc % de la masa alimentada de zinc	$R = \frac{C_c}{F_f} \times 100\%$	-C: Peso del concentrado c: Ley de zinc en el concentrado F: Peso de la alimentación f: Ley de zinc en la alimentación.	Experimental
Variable Independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Formula	Indicadores	Escala
Dosificación de Cianuro de sodio	Es la aplicación controlada y proporcional de este compuesto químico, el cual es disuelto en agua para constituir una solución cianurada con	Esta variable se medirá con la micropipeta de forma experimental	Reactivo depresor	$D = \frac{Q \times C_x}{10/TML}$	Q: Gasto o caudal de la solución del reactivo (ml/min). C: Concentración de la solución del reactivo (%).	Experimental

	<p>una concentración específica de cianuro libre. Este proceso es el componente operativo fundamental de la lixiviación, donde la solución es distribuida de manera uniforme sobre el mineral aurífero para facilitar una reacción química de transferencia de fase (Cuesta et al., 2024)</p>				TML: Tonelaje de mineral seco (TMS/h)
Dosificación de sulfato de cobre	<p>La dosificación de sulfuro de cobre es un proceso técnico utilizado principalmente en la industria minera y metalúrgica, así como en aplicaciones de tratamiento de aguas y agricultura (González et al., 2021).</p>	<p>Está variable se medirá con micropipeta de forma experimental</p>	<p>Reactivo activador</p>	<p>Q: DxTML/(Cx10)</p>	<p>D: Dosificación del reactivo (g/t). C: Concentración de la solución del reactivo (%). TML: Tonelaje de mineral seco (TMS/h)</p>

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. BASES TEÓRICAS

2.1.1. Reactivos de flotación

Los reactivos de flotación son compuestos químicos utilizados en el proceso de flotación para mejorar la separación de los minerales valiosos de la ganga (material no deseado). Estos reactivos pueden influir en las propiedades físicas y químicas de las partículas minerales, la espuma y la solución (pulpa), y se clasifican generalmente en varias categorías según su función específica en el proceso (Gregory et al., 2020). Las principales categorías de reactivos de flotación incluyen:

- **Colectores:** Son compuestos orgánicos que aumentan la hidrofobicidad de la superficie del mineral. Se adsorben selectivamente en las superficies de los minerales de interés, permitiendo su adhesión a las burbujas de aire (Gregory et al., 2020).
- **Espumantes:** Ayudan a formar y estabilizar la espuma donde se concentran los minerales hidrofóbicos. Esto facilita la separación y recolección de los minerales de interés (Gregory et al., 2020).
- **Reguladores de pH:** Se utilizan para ajustar el pH de la pulpa a un valor que optimice la acción de los colectores y otros reactivos. El pH puede afectar significativamente la adsorción de los reactivos en las superficies minerales y, por tanto, la eficacia de la flotación (Gregory et al., 2020).
- **Activadores y Depresores:** Estos reactivos pueden usarse para suprimir la flotación de ciertos minerales no deseados o para modificar las condiciones

de la pulpa para favorecer la flotación de los minerales de interés (Gregory et al., 2020).

2.1.2. Modelado y simulación de la flotación

El modelado y la simulación de la flotación constituyen una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos mineros, permitiendo la optimización y el diseño eficiente de las operaciones de flotación sin necesidad de realizar costosas pruebas a escala real. A través de modelos matemáticos y software de simulación avanzados, los ingenieros pueden predecir el comportamiento de los procesos de flotación bajo diversas condiciones operativas, facilitando la toma de decisiones informadas para la mejora continua de la eficiencia y la productividad (Patzí, 2019). Esta sección se enfoca en dos aspectos clave:

- **Modelos Matemáticos:** Los modelos matemáticos en la flotación se desarrollan para representar las complejas interacciones entre las variables del proceso, como las propiedades fisicoquímicas de los minerales, la concentración y tipos de reactivos, el pH, la granulometría del mineral, y la dinámica de las burbujas y las partículas en la pulpa (Patzí, 2019).
- **Software de Simulación:** El software de simulación utiliza estos modelos matemáticos para predecir el comportamiento del proceso de flotación y evaluar el impacto de cambios en las variables de proceso (Patzí, 2019).

Asimismo, Minitab, el modelado se refiere al proceso de ajustar datos a modelos estadísticos para comprender y predecir el comportamiento de un proceso o fenómeno. Minitab es un software estadístico que proporciona herramientas para realizar análisis de datos y modelado estadístico de manera eficiente. El modelado en Minitab implica utilizar diversas técnicas estadísticas, como regresión lineal, regresión logística, ANOVA (Análisis de Varianza), entre otras (Patzí, 2019).

2.1.3. Aspectos ambientales y de sostenibilidad para gestión de residuos y efluentes

La gestión de residuos y efluentes, junto con la implementación de prácticas de sostenibilidad, constituye un pilar fundamental en la minería moderna, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y promover una operación más eficiente y responsable. Para ello, se hace imprescindible el tratamiento adecuado de las aguas residuales, asegurando la eliminación de contaminantes antes de su descarga, y una gestión cuidadosa de los relaves para prevenir la contaminación del suelo y del

agua. La optimización de los procesos para reducir la generación de residuos es otra estrategia clave, buscando maximizar la recuperación de minerales y disminuir los desechos.

La adopción de estándares de minería responsable favorece prácticas éticas y sostenibles, mientras que el reciclaje y reutilización de agua en las operaciones mineras disminuyen la demanda de recursos hídricos. La integración de energías renovables contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles, y los planes de cierre de minas que incluyen la restauración ecológica fomentan la recuperación de ecosistemas. Además, la investigación y adopción de tecnologías innovadoras permiten una operación más limpia y eficiente.

2.1.4. Normativas de regulación de prácticas de operación de plantas concentradoras en Perú

La regulación de las prácticas de operación de plantas concentradoras en Perú se rige bajo un marco normativo estricto, diseñado para asegurar la protección del medio ambiente, la salud y seguridad de los trabajadores, y el uso eficiente de los recursos naturales. Este marco incluye diversas leyes, regulaciones y estándares técnicos que las empresas mineras deben cumplir para operar dentro del territorio peruano (Echevarria y Samaniego, 2020). Dentro de estas se tiene:

- **Ley General de Minería:** Establece los principios generales para el desarrollo de la actividad minera en el país, incluidas las operaciones de plantas concentradoras. Define las obligaciones de las empresas mineras en términos de licencias, impacto ambiental y responsabilidad social (Echevarria y Samaniego, 2020).
- **Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería:** Este reglamento especifica las medidas de seguridad y salud que deben implementarse en todas las operaciones mineras, incluidas las plantas concentradoras. Cubre aspectos como la gestión de riesgos, el uso de equipo de protección personal, la capacitación de los trabajadores y la vigilancia de la salud (Echevarria y Samaniego, 2020).
- **Ley y Reglamento del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (SEIA):** Obliga a las empresas a someter sus proyectos, incluidas las plantas concentradoras, a una evaluación de impacto ambiental (EIA) antes de iniciar operaciones. Esto asegura que se identifiquen, prevengan y mitiguen los posibles impactos ambientales (Echevarria y Samaniego, 2020).

- **Normas Técnicas Peruanas sobre Gestión Ambiental:** Estas normas establecen los requisitos para la gestión ambiental de las operaciones mineras, incluyendo el manejo de residuos, emisiones, efluentes y la conservación del agua (Echevarria y Samaniego, 2020).
- **Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades Minero Metalúrgicas:** Específico para el sector minero, este reglamento establece límites máximos permisibles para emisiones, efluentes y residuos, además de requerir el monitoreo y reporte regular de estos parámetros (Echevarria y Samaniego, 2020).

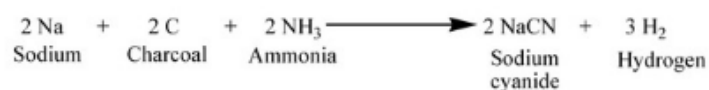
2.1.5. NaCN

Representa un compuesto químico que conlleva a desafíos ambientales significativos, debido a la generación masiva de residuos tanto líquidos como sólidos que albergan diversas variantes de este compuesto, por lo cual, la ciencia ha explorado el potencial de ciertos microorganismos para la degradación biológica (Arias et al., 2024)

Por otro lado, se conoce al cianuro de sodio como un compuesto cristalino con una fuerte tendencia a atraer la humedad del ambiente. Sin embargo, su rasgo más delicado es su inestabilidad química frente a los ácidos, puesto que esta reacción genera cianuro de hidrógeno, un gas altamente tóxico que requiere protocolos de manejo estrictos (Monga et al., 2022).

Figura 1

Esquema de la preparación de cianuro de sodio mediante el proceso de Castner.



2.1.5.1. Uso y mecanismo del NaCN

El uso del cianuro es clave en la industria minera, específicamente en la cianuración para extraer oro y en la flotación para concentrar diversos minerales. Su versatilidad química permite que se utilice en una gran variedad de aplicaciones, desde la fumigación de embarcaciones hasta la fabricación de plásticos y procesos metalúrgicos.

En términos de reactividad, el cianuro de sodio funciona para inhibir la flotación (deprimir) de minerales como la pirita y la esfalerita. Por el contrario, no afecta significativamente a la galena, lo que facilita la separación de esta última cuando se encuentra mezclada con calcopirita. Para optimizar la recuperación en yacimientos polimetálicos, los ingenieros suelen optar por complejos químicos de cianuro-zinc o amoniacaes; esto garantiza que el oro y la plata permanezcan estables y no se pierdan en el circuito de procesamiento (Rojas y Chaca, 2023).

2.1.6. CuSO₄

Se ha consolidado como una herramienta multifuncional en la purificación del agua y el control de plagas, siendo eficaz contra crustáceos indeseados y microorganismos patógenos. Su utilidad se extiende a la agricultura, donde no solo actúa como un escudo contra enfermedades fúngicas, sino que también favorece el desarrollo vegetal mediante la estimulación de la fotosíntesis y la producción vitamínica. A pesar de estas ventajas y de su bajo costo operativo, existe una preocupación creciente por su impacto residual. La acumulación de altas concentraciones de cobre en fuentes hídricas, producto de una gestión agrícola deficiente, puede transformar este beneficio en un contaminante persistente que afecta tanto a los ecosistemas naturales como a la salud humana (Zargari et al., 2023).

2.1.6.1. Mecanismo de CuSO₄

Para el ensayo, se preparó inicialmente una solución madre de sulfato de cobre (Macklin Biochemical Technology Co.) empleando 2 ml de medio RPMI 1640. La mezcla se homogeneizó mediante agitación en vórtex y se esterilizó a través de una doble filtración con membranas de 0,22 μm antes de su almacenamiento. Posteriormente, se ajustó una suspensión de *C. albicans* en medio RPMI hasta alcanzar una densidad celular de 1×10^7 células/ml. Esta levadura se expuso a un gradiente de concentraciones de sulfato de cobre (desde 100 hasta 51,200 μM) en placas de microtitulación de 96 pocillos, procediendo a una incubación de 24 horas. Para cuantificar la viabilidad celular, se realizaron diluciones seriadas de cada tratamiento, las cuales se sembraron en placas de agar YPD e incubaron a 37 °C por un día. Finalmente, se realizó el recuento de unidades formadoras de colonias (UFC) y los valores obtenidos se transformaron a escala logarítmica para su análisis.

Tras la inoculación en placas de 96 pocillos, las muestras se mantuvieron en incubación durante 24 horas bajo condiciones de oscuridad total. Para los grupos

sometidos a terapia fotodinámica, se realizó un doble lavado con solución salina tamponada con fosfato (PBS) y se resuspendieron las células en medio fresco (RPMI 1640). Acto seguido, las muestras se expusieron a la radiación de diodos emisores de luz (LED) durante 30 minutos. Al igual que en la fase anterior, se aplicó el método de dilución seriada en agar YPD, incubando a 37 °C por 24 horas. La eficacia del tratamiento se determinó mediante el recuento de colonias y su posterior conversión a valores logarítmicos (Zhang et al., 2024).

2.1.7. Pirita

Es conocida por ser el segundo mineral que más alberga partículas de oro. La dificultad de su tratamiento radica en que el oro está diseminado en tamaños diminutos, que oscilan entre 0,1 y 1,0 micras. Esta característica obliga a los procesadores a utilizar métodos de trituración severos o tratamientos oxidativos, ya que son las únicas vías para liberar el oro atrapado en la estructura del sulfuro (Rodríguez et al., 2022).

Del mismo modo, se considera a la pirita como el sulfuro de mayor prevalencia en la corteza terrestre, con una presencia ubicua que abarca desde formaciones sedimentarias y magmáticas hasta complejos metamórficos. Su relevancia es particularmente notable en los sistemas hidrotermales, donde suele constituir uno de los componentes minerales primordiales (Mederski et al., 2022)

2.1.8. RSM

Se fundamenta en la integración de herramientas estadísticas y matemáticas para analizar la interacción entre diversos factores críticos. Su principal ventaja radica en la capacidad de identificar las condiciones óptimas mediante un diseño experimental eficiente. Al implementar la RSM, es posible simplificar las fases de investigación, optimizar los tiempos de ejecución y, fundamentalmente, disminuir los costos operativos al minimizar la cantidad de ensayos requeridos (Fajdek et al., 2023).

Por otro lado, la RSM constituye una herramienta estadística avanzada orientada al diseño experimental y la optimización de parámetros operativos. Este enfoque se sustenta en los fundamentos del Diseño de Experimentos (DOE), una rama de la estadística aplicada que permite la planificación y ejecución de pruebas controladas para discernir cómo influyen diversos factores en un sistema determinado y posee una capacidad notable para modelar y perfeccionar el

rendimiento y las emisiones en motores de combustión interna (MCI) (Veza et al., 2023).

2.1.9. Depresión de sulfuros de hierro

En la flotación de sulfuros de Cu-Fe bajo condiciones de baja alcalinidad, se emplean comúnmente agentes depresores de origen orgánico e inorgánico. Tradicionalmente, los compuestos inorgánicos como los agentes oxidantes y derivados de azufre-oxígeno han sido efectivos para inhibir la flotabilidad de la pirita. No obstante, su aplicación industrial enfrenta limitaciones críticas debido a su impacto ambiental y altos costos operativos. A pesar de su baja toxicidad, estos reactivos suelen presentar una selectividad reducida, exigiendo dosificaciones elevadas para ser efectivos, lo que incrementa la inversión en equipos y logística.

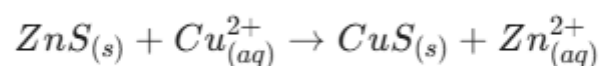
En contraste, los depresores orgánicos biodegradables emergen como una alternativa alineada con la minería sostenible. Estos compuestos destacan por su alta eficiencia a bajas concentraciones y su versatilidad estructural, permitiendo diseños moleculares basados en química cuántica para sistemas de flotación específicos. La interacción en la interfaz mineral-reactivo es un fenómeno complejo que involucra mecanismos de atracción electrostática, puentes de hidrógeno y quimisorción entre los grupos funcionales del depresor (como carboxilos o sulfonilos) y los cationes metálicos de la superficie mineral (Feng et al., 2024).

2.1.10. Activación de esfalerita

Se define como el proceso de modificación química de su superficie para permitir la adsorción de colectores (como los xantatos), la cual es naturalmente deficiente debido a la baja reactividad del zinc.

Figura 2

Esquema de activación de esfalerita



Debido a que el xantato no se adhiere eficientemente al zinc, se utiliza un agente activador, comúnmente sulfato de cobre. Los iones de cobre reemplazan a los iones de zinc en la superficie, creando una capa de sulfuro de cobre que es afín al colector hidrofóbico. Por lo tanto, la marmatita, al ser una variedad de esfalerita

rica en hierro, presenta un comportamiento electroquímico distinto. La salinidad puede exacerbar la formación de hidróxidos de hierro en la superficie, lo cual actúa como una barrera hidrofílica que impide tanto la activación como la posterior flotación y afecta la tensión superficial, lo que puede compensar o dificultar la adhesión de la esfalerita activada a la burbuja de aire, dependiendo de la fuerza iónica del medio (Mateos, 2020).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Unidad Minera Catalina Huanca está ubicada en el distrito de Canaria, provincia de Víctor Fajardo, departamento de Ayacucho, Perú. La Planta Concentradora San Jerónimo, diseñada para el tratamiento de sulfuros mediante circuitos de flotación diferencial, presenta una configuración topográfica escalonada que optimiza el flujo de pulpa por gravedad entre las etapas de molienda, acondicionamiento y flotación. Asimismo, el Laboratorio Metalúrgico se encuentra integrado al complejo para el monitoreo en tiempo real de los parámetros operativos, como se muestra a continuación.

Figura 3

Ubicación de la planta concentradora y laboratorio



Nota. Tomado de <https://maps.app.goo.gl/PGh66WLW42K4APL38>

Figura 4

Vista aérea de la planta concentradora y laboratorio



3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Bajo el método científico, fue tratada como aplicada, ya que busca utilizar las competencias desarrolladas a lo largo de la educación formal para ofrecer respuestas a situaciones reales que surgen en el entorno cotidiano (Arias y Covinos, 2021).

Asimismo, comprendió un nivel explicativo, dado que este tipo de nivel se refiere a un tipo de estudio que va más allá de la descripción de conceptos y fenómenos o el establecimiento de relaciones entre variables. Su objetivo principal es entender las causas y los efectos de los fenómenos, proporcionando respuestas a las preguntas del porqué ocurren ciertos hechos y bajo qué circunstancias. Este tipo de investigación busca profundizar en el conocimiento de la realidad para explicar de manera integral los fenómenos de estudio (Arias y Covinos, 2021).

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Se adoptó un diseño experimental, dado que se basa en la estrategia más robusta para determinar vínculos de causalidad, gracias a su capacidad de controlar

variables y emplear la asignación aleatoria. La implementación de este modelo tiene como fin principal reducir las distorsiones (sesgos) y fortalecer la validez interna del estudio. De este modo, el investigador cuenta con una base sólida para proyectar inferencias determinantes sobre la interacción entre las variables analizadas (Vízcaíno et al., 2023). La investigación incorpora procedimiento experimental, matriz de pruebas, análisis estadístico y redefine técnicas/instrumentos como ensayos de flotación, análisis químico, balances metalúrgicos y uso de Minitab.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

En cualquier investigación es fundamental tener un grupo objetivo que será analizado. Este grupo está compuesto por individuos que el investigador desea examinar con mayor profundidad (Medina et al., 2023). En este caso estuvo compuesta por el mineral complejo de zinc procesado en la Planta Concentradora “San Jerónimo” de la Unidad Minera Catalina Huanca, Ayacucho en el año 2025.

La muestra, por su parte, es una porción que sirve de representación del total de la población, generalmente es el grupo al cual se le aplicará un instrumento de medición (Medina et al., 2023). La muestra del estudio estuvo constituida por el compósito representativo en la Planta Concentradora “San Jerónimo” de la Unidad Minera Catalina Huanca, Ayacucho en el año 2025.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica aplicada fueron los experimentos en laboratorio, que consiste en la aplicación de métodos técnicos dentro de un laboratorio para regular y transformar los componentes de estudio, asegurando que cada cambio observado sea producto del control experimental y no del azar (Vízcaíno et al., 2023). Los instrumentos utilizados fueron la ficha de recolección de datos: balances metalúrgicos, los ensayos de laboratorio, el análisis de ley de cabeza, el análisis granulométrico, balances metalúrgicos de las pruebas del diseño experimental y cuadro de dosificación de reactivos para cada prueba del diseño experimental.

3.6. EQUIPOS Y MATERIALES

En primer lugar, se buscó definir con precisión el estado de eficiencia en la obtención de concentrado de zinc en la planta de San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca, ubicada en Ayacucho. Para lograr esto, se tomó en cuenta tanto la Ley de cabeza de entrada como la Ley de recuperación. La Ley de cabeza de entrada proporcionó información crucial sobre la calidad del mineral que se está procesando,

permitiendo identificar si la alimentación al proceso de flotación contiene la concentración óptima de minerales de zinc.

Por otro lado, la Ley de recuperación reveló la eficiencia con la que se extraen estos minerales valiosos durante el proceso de flotación, ofreciendo una medida directa de la efectividad del proceso. Al analizar detalladamente ambas leyes, se obtuvo una evaluación completa de la eficiencia del proceso de obtención de concentrado de zinc en la planta de San Jerónimo, lo que permitió identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas para optimizar el rendimiento operativo y económico de la planta.

Esto implicó un minucioso análisis descriptivo de los datos recopilados, tanto históricos como actuales, para comprender en profundidad el rendimiento del proceso, teniendo en cuenta que el estándar que maneja la empresa actualmente es de 51,5% calidad y 92,5% de recuperación. Para ello se utilizaron las cartas de control X y R, que más explícitamente, son herramientas fundamentales en el control estadístico de procesos. La carta de control X se enfoca en monitorear la media o promedio de un proceso a lo largo del tiempo. Para ello, se toman muestras en intervalos regulares y se calcula la media de cada una, representándolas en la carta junto con límites de control que indican variaciones significativas. Por otro lado, la carta de control R se utiliza para vigilar la variabilidad del proceso. Se calcula el rango de las muestras, es decir, la diferencia entre el valor máximo y mínimo de cada una, y se representan en la carta junto con límites de control. Esto ayuda a detectar cambios en la variabilidad del proceso, lo que puede indicar problemas que requieran corrección.

Se calcularon estadísticas descriptivas y se representaron gráficos de control, herramientas que permitieron identificar cualquier desviación significativa en el proceso y determinar si la eficiencia se mantiene dentro de los estándares aceptables.

En segundo lugar, se procedió al diseño de un sistema de control de flotación adaptado específicamente a las necesidades y particularidades de la planta. Para ello, se emplearon técnicas avanzadas de análisis de correlación y modelado predictivo a través de Minitab. Se determinaron los factores esenciales que afectan la calidad del concentrado de zinc y se crearon modelos de predicción para anticipar esta calidad basándose en las condiciones operativas. Luego, se utilizaron

estrategias de optimización para establecer la configuración ideal de los parámetros de flotación que mejoren al máximo la calidad del concentrado.

Además de los análisis estadísticos mencionados, se llevó a cabo un comparativo del control de flotación en la obtención de concentrado de zinc en la planta de San Jerónimo por kg/t. Para realizar este comparativo económico, se estimaron los costos asociados antes y después de la implementación del control de flotación. Esto incluyó costos relacionados con materias primas, mano de obra, equipos, energía, mantenimiento y cualquier otro costo relevante para el proceso de obtención del concentrado de zinc. Estos métodos permitieron determinar si la inversión en el control de flotación ha generado beneficios económicos significativos, como la reducción de costos operativos, el aumento de la eficiencia en la producción o la mejora en la calidad del producto final.

En cuanto a los recursos materiales, se presenta el listado:

- Cargador frontal 966
- Tolva de gruesos de 240 TMH
- Tolva de cal de 20 toneladas
- Faja alimentadora FA-1y FB-1 de 36"
- Electroimán
- Detector de metales
- Zaranda vibratoria Simplicity
- Chancadora de quijada de 24 x 36" Comesa
- Chancadora Symons SH – HP-300
- Chancadora giratoria HP-200
- Tolva de finos No.1 y Tolva finos No.2 con cap. de 350 TMH
- Extractor polvo y bomba hidrostal
- Molino de Barras de 9.5x14'
- Molino de Bolas 8x6' - Marcy
- Molino de Bolas 6x6' - Funca
- Molino de Bolas 7x8' - Comesa
- Molino de Bolas 8x6' - Kurimoto
- Molino de Bolas 6x6' - Denver
- Bombas Warman MCC-125 y 150 a la descarga de los Molinos
- Zarandas de alta frecuencia - Derrick

- Nido de hidrociclones D-15
- 02 hidrociclones D-20
- 02 hidrociclones D-15
- Celdas de flotación ROUGHER
- Celdas de flotación SCAVENGER
- Celdas de flotación CLEANER
- Acondicionadores de pulpa

Posteriormente, se realizó un ajuste del modelo cuadrático en donde se representa la relación entre las variables mediante una ecuación polinómica de segundo grado. Seguidamente, se analizó la varianza (ANOVA) en donde se aplicó Prueba F, para comparar la varianza explicada por el modelo contra la varianza del error. Si el p-valor $< 0,05$, el modelo es estadísticamente significativo y los términos con $p > 0,05$ deben simplificar el modelo, siempre que no afecten la jerarquía del mismo y finalmente a través del cálculo de derivadas parciales, se determinan los valores exactos de x que optimizan el sistema.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL Y CONDICIONES BASE

4.1.1. Ley de cabeza de la muestra experimental

El material para todos los ensayos de laboratorio se obtuvo de un muestreo sistemático para generar un compósito representativo. Los análisis químicos de esta muestra, realizados por el Laboratorio Químico Minlab S.R.L., se reportan en la tabla. Esta composición fue verificada consistentemente en los ocho reportes de análisis de laboratorio.

Tabla 2

Ley de cabeza de la muestra especial

Código de Muestra	% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
MUESTRA ESPECIAL	0,46	11,11	25,74	0,13	0,84

El dato más relevante de esta caracterización es la Ley de Cabeza de Zinc, fijada en 11,11% Zn. Este valor es significativamente superior al promedio operativo reportado en el planteamiento del problema de la planta "San Jerónimo", que maneja una ley de cabeza del 7% Zn

Por otro lado, la flotación de minerales de alta ley de zinc presenta problemas metalúrgicos particulares, incluyendo pérdidas significativas de contenido metálico. Por lo tanto, los resultados de optimización de este estudio se aplican a un escenario

de alta ley, donde se espera una mayor dificultad para alcanzar la calidad (Ley de Concentrado) deseada, en comparación con el mineral promedio de la planta. El alto contenido de hierro (25,74% Fe) también sugiere una mineralogía compleja, probablemente con alta presencia de pirita o marmatita, lo que justifica la necesidad de un control riguroso de los reactivos depresores.

4.1.2. Parámetros operativos constantes

Para asegurar la correcta liberación de las especies minerales de interés (esfalerita) de la ganga, se realizó un estudio de cinética de molienda. Se analizaron los perfiles granulométricos de la muestra especial a tiempos de 3, 6 y 10 minutos. Los resultados de estos análisis permitieron calcular el P_{80} (la abertura de malla por la cual pasa el 80% del material) para cada tiempo.

- Tiempo 3 min: $P_{80} = 220,5 \mu\text{m}$
- Tiempo 6 min: $P_{80} = 135,2 \mu\text{m}$
- Tiempo 10 min: $P_{80} = 93,8 \mu\text{m}$

Figura 5

Cinética de molienda Vs tiempo

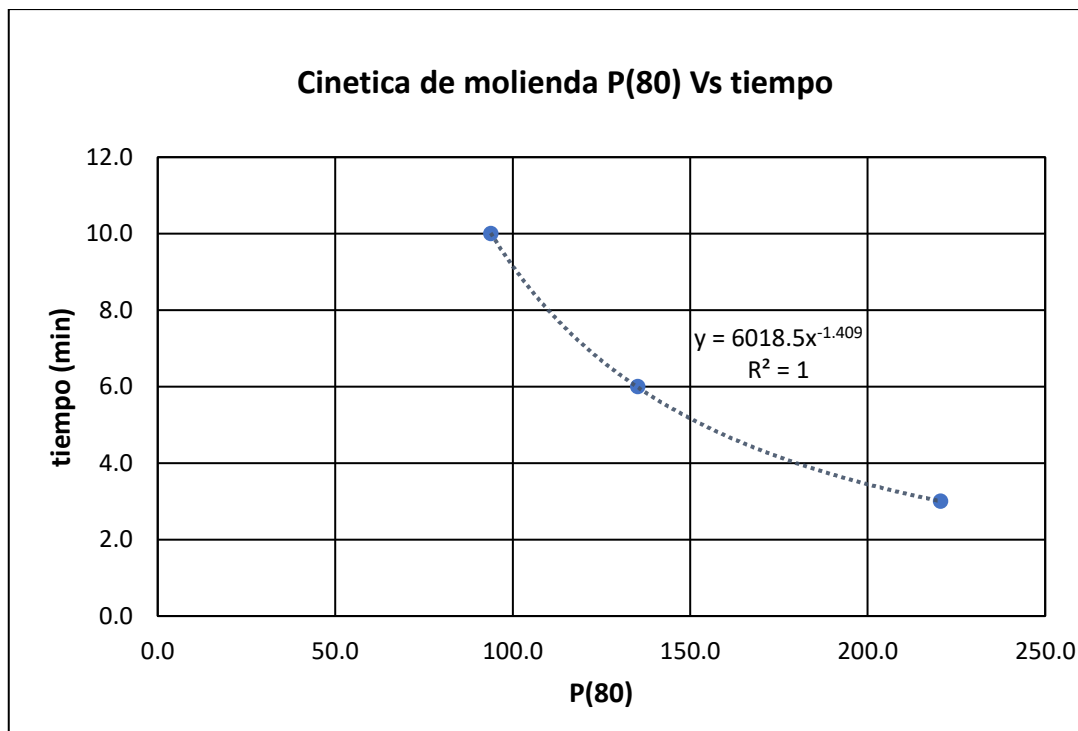
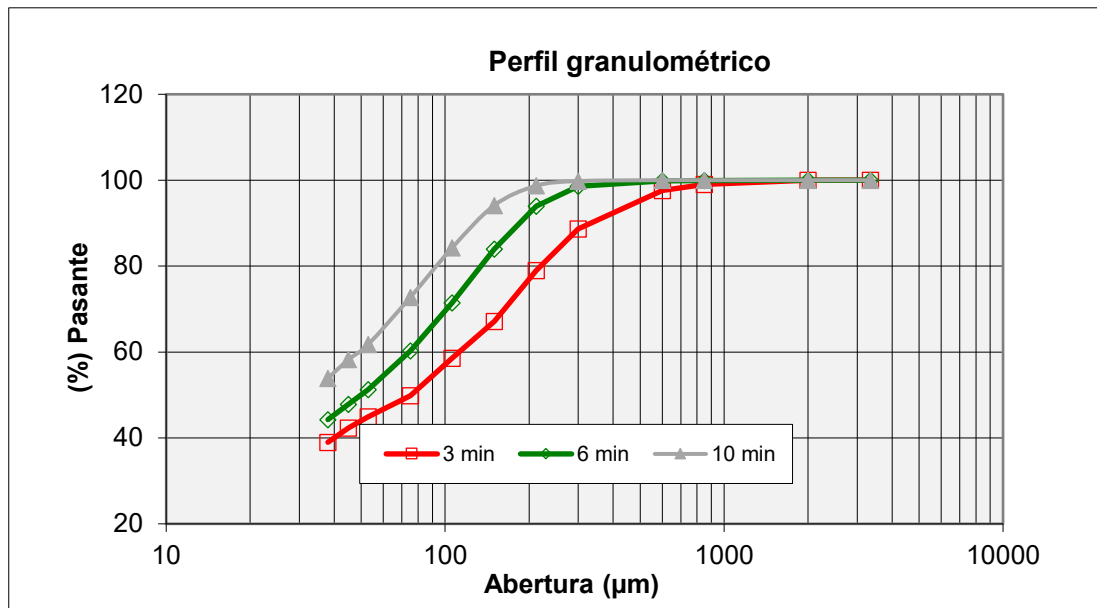


Figura 6*Perfil granulométrico*

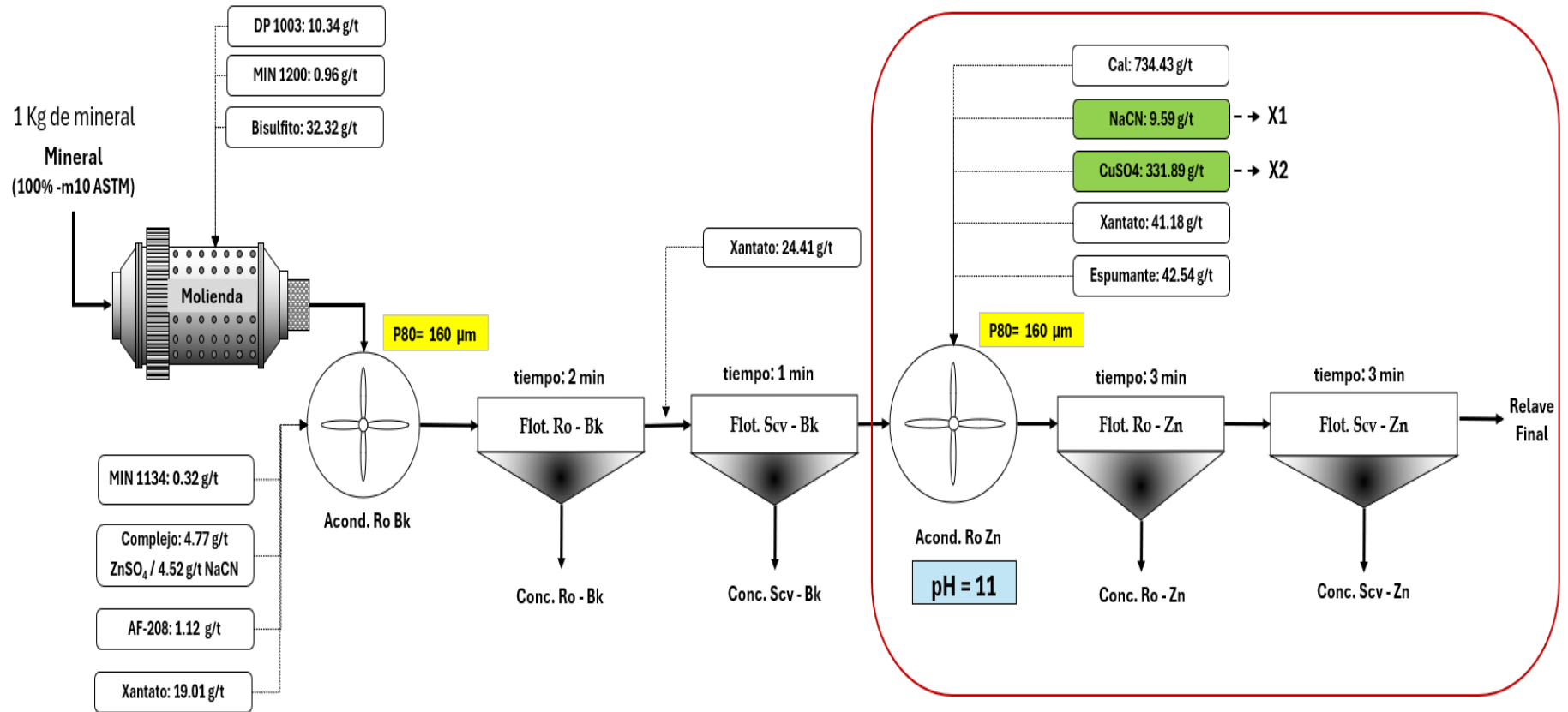
Los balances metalúrgicos de las pruebas de flotación (Pruebas 1-8) especifican que todos los ensayos se realizaron bajo una condición estandarizada de P_{80} 160 µm. Esta granulometría, que según los datos de cinética se alcanzaría con un tiempo de molienda interpolado de aproximadamente 5,12 minutos, representa un balance metalúrgico. Se busca una molienda lo suficientemente fina para liberar el zinc, pero evitando la sobre-molienda P_{80} muy bajos, como 93,8 µm) que generaría un exceso de lamas (finos), las cuales son perjudiciales para la selectividad y eficiencia de la flotación.

Para aislar el efecto de las variables independientes estudiadas, todos los demás parámetros del proceso se mantuvieron fijos y constantes a lo largo de las 8 pruebas experimentales.

- **Condiciones de Pulpa (pH):** Todas las pruebas del circuito de zinc se operaron a un pH = 11. Este pH alcalino, mantenido con Cal, es estándar para la depresión de la pirita (Fe) y para optimizar la activación de la esfalerita.
- **Tiempos de Flotación (Circuito de Zinc):** Se utilizó un tiempo de flotación de 3 minutos para la etapa *Rougher (Ro) Zn* y 3 minutos para la etapa *Scavenger (Scv) Zn*, sumando un tiempo total de flotación de 6 minutos.

- **Otros Reactivos:** Las dosificaciones de otros reactivos, como el colector primario (Xantato Z-11) y el espumante (MIBC), se mantuvieron constantes según el estándar de laboratorio para asegurar que las únicas variables influyentes fueran las estudiadas en el diseño experimental.

Figura 7
Esquema de flotación Bulk y Zn



4.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.2.1. Matriz del diseño experimental

Se ejecutó un diseño experimental hexagonal con dos réplicas en el punto central, totalizando 8 pruebas experimentales. Las variables independientes seleccionadas para optimizar la selectividad y activación, basadas en la problemática del alto hierro y los objetivos, fueron el Cianuro de Sodio (X1) y el Sulfato de Cobre (X2). El diseño se consolida de la siguiente manera:

Tabla 3

Diseño experimental hexagonal y respuestas metalúrgicas

ID del Ensayo	X1: NaCN (g/t)	X2: CuSO ₄ (g/t)	Respuesta 1: Recuperación de Zinc (%)	Respuesta 2: Recuperación de Hierro (%)
1	28,77	497,85	90,25	10,2
2	23,98	641,56	87,85	8,35
3	14,39	641,56	86,10	9,26
4	9,59	497,85	89,10	10,16
5	14,39	354,14	88,55	10,47
6	23,98	354,14	87,67	9,19
7	19,18	497,85	91,84	12,38
8	19,18	497,85	91,03	10,25

Nota. Elaboración propia a partir de datos de X1 y X2, y respuestas.

De la tabla anterior se puede apreciar que las pruebas 7 y 8 fueron réplicas idénticas del punto central (NaCN = 19,18 g/t; CuSO₄ = 497,85 g/t). Asimismo, los resultados de respuesta para estas réplicas fueron altamente consistentes (recuperación: 91,84% vs 91,03%; Ley: 47,16% vs 47,80%). Esta baja variabilidad entre las réplicas valida la reproductibilidad y confiabilidad del procedimiento experimental realizado dentro del laboratorio, de modo que se aprecia un bajo error puro.

4.2.2. Balances metalúrgicos completos por pruebas experimentales

A continuación, se muestran los balances metalúrgicos detallados para cada una de las 8 pruebas experimentales realizadas, ya que fueron la base de datos primaria y evidencian las leyes obtenidas, los pesos, distribución de metales y recuperaciones calculadas.

Tabla 4

Balance metalúrgico – Prueba 1 (MT-01)

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	1,709	17,75	13,66	11,53	2,334	2,344
Conc. Rougher (Zn)	16,234	0,37	45,30	11,56	73,540	73,824
Conc. Scavenger (Zn)	5,174	0,42	31,62	14,65	16,360	16,423
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	21,408	0,38	41,99	12,31	89,900	90,247
Relave	76,883	0,10	0,96	29,92	7,381	7,409
Cabeza Calculada	100,000	0,46	9,96	25,84	99,615	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=28,77 g/t, CuSO₄=497,85 g/t

Tabla 5

Balance metalúrgico – Prueba 2 (MT-02)

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	2,280	14,10	14,12	14,57	3,219	3,107
Conc. Rougher Zn)	13,754	0,32	46,20	10,80	63,543	61,330
Conc. Scavenger (Zn)	6,568	0,36	41,84	12,66	27,481	26,523
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	20,322	0,33	44,79	11,40	91,024	87,854
Relave	77,398	0,09	1,21	32,42	9,365	9,039
Cabeza Calculada	100,000	0,46	10,36	27,74	103,609	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=23,98 g/t, CuSO₄=641,56 g/t

Tabla 6*Balance metalúrgico – Prueba 3 (MT-03)*

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	2,011	16,22	14,60	15,14	2,936	2,810
Conc. Rougher (Zn)	13,214	0,31	46,88	11,49	61,947	59,292
Conc. Scavenger (Zn)	6,499	0,36	43,10	14,34	28,011	26,810
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	19,713	0,33	45,63	12,43	89,958	86,102
Relave	78,276	0,11	1,48	30,30	11,585	11,088
Cabeza Calculada	100,000	0,48	10,45	26,47	104,479	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=14,39 g/t, CuSO₄=641,56 g/t

Tabla 7*Balance metalúrgico – Prueba 4 (MT-04)*

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	2,290	13,88	13,41	15,87	3,071	2,853
Conc. Rougher (Zn)	13,970	0,31	48,56	12,48	67,838	63,016
Conc. Scavenger (Zn)	6,346	0,37	44,24	14,96	28,075	26,079
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	20,316	0,33	47,21	13,25	95,913	89,095
Relave	77,394	0,08	1,12	30,28	8,668	8,052
Cabeza Calculada	100,000	0,45	10,77	26,49	107,652	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=9,59 g/t, CuSO₄=497,85 g/t

Tabla 8*Balance metalúrgico – Prueba 5 (MT-05)*

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	1,680	19,37	14,11	16,07	2,370	2,181
Conc. Rougher (Zn)	13,450	0,31	48,84	12,79	65,690	60,445
Conc. Scavenger (Zn)	6,797	0,40	44,94	14,20	30,546	28,107
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	20,247	0,34	47,53	13,26	96,236	88,552
Relave	78,073	0,09	1,29	29,08	10,071	9,267
Cabeza Calculada	100,000	0,46	10,87	25,66	108,677	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=14,39 g/t, CuSO₄=354,14 g/t

Tabla 9*Balance metalúrgico – Prueba 6 (MT-06)*

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	1,570	21,78	14,71	13,76	2,309	2,139
Conc. Rougher (Zn)	11,840	0,31	48,80	11,49	57,779	53,518
Conc. Scavenger (Zn)	8,016	0,37	46,00	13,61	36,874	34,154
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	19,856	0,33	47,67	12,35	94,653	87,672
Relave	78,574	0,08	1,40	30,56	11,000	10,189
Cabeza Calculada	100,000	0,47	10,80	26,68	107,963	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=23,98 g/t, CuSO₄=354,14 g/t

Tabla 10*Balance metalúrgico – Prueba 7 (MT-07)*

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	2,138	17,56	14,40	15,81	3,079	2,783
Conc. Rougher (Zn)	17,698	0,32	48,96	13,77	86,649	78,321
Conc. Scavenger (Zn)	3,846	0,40	38,88	19,54	14,953	13,516
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	21,544	0,33	47,16	14,80	101,603	91,837
Relave	76,318	0,09	0,78	29,12	5,953	5,381
Cabeza Calculada	100,000	0,52	11,06	25,75	110,634	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=19,18 g/t, CuSO₄=497,85 g/t

Tabla 11*Balance metalúrgico – Prueba 8 (MT-08)*

Productos	% Peso	%Pb	% Zn	%Fe	Contenido Zn (g)	Recuperación Zn (%)
Conc. Plomo (Pb)	1,724	17,72	14,37	15,19	2,477	2,204
Conc. Rougher (Zn)	15,736	0,33	49,88	11,44	78,491	69,829
Conc. Scavenger (Zn)	5,670	0,40	42,02	16,64	23,825	21,196
Conc. Zinc (Zn) (Consolidado)	21,406	0,35	47,80	12,82	102,317	91,026
Relave	76,870	0,09	0,99	30,92	7,610	6,770
Cabeza Calculada	100,000	0,45	11,24	26,77	112,404	100,000
<i>Cabeza Ensayada</i>		<i>0,46</i>	<i>11,11</i>	<i>25,74</i>		

Nota. Condiciones: NaCN=19,18 g/t, CuSO₄=497,85 g/t

4.3. ANÁLISIS INTERPRETATIVO DE X1 y X2

4.3.1. Efecto de X1: Cianuro de Sodio

Como se pudo analizar en la caracterización de la muestra experimental (MT), el desafío metalúrgico de este mineral es el alto contenido de hierro. Por lo tanto, la variable experimental crítica para la selectividad no sería el Xantato (el cual se ha mantenido constante), sino el depresor de hierro, el cianuro de Sodio (NaCN). Al respecto, para aislar el efecto del NaCN se comparan las pruebas donde X2 (CuSO₄) se mantuvo constante en su nivel central (497,85 g/t), tal como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 12

Efecto de la dosificación de NaCN

Prueba	Nivel de NaCN	Dosificación NaCN (g/t)	Recuperación Zn (%)	Ley Concentrado Zn (%)
Prueba 4	Bajo	9,59	89,10	47,21
Pruebas 7/8 (Prom.)	Medio	19,18	91,43	47,48
Prueba 1	Alto	28,77	90,25	41,99

En concordancia con la Tabla 12, se valida un efecto no lineal de nivel bajo a medio (9,59 a 19,18 g/t) donde la recuperación del Zinc aumentó significativamente (89,10% a 91,43%) mientras que la Ley de Concentrado se mantuvo alta y estable (47,21% vs 47,48%). Esto permite asumir que la dosis de 9,59 g/t era insuficiente como depresor, permitiendo que el Fe flotara, consumiera reactivos y diluyera el concentrado, afectando la recuperación de Zn.

Bajo esta línea, la Ley del concentrado colapsó drásticamente, cayendo de 47,48% a 41,99%. Este fenómeno es un indicador clásico de sobredosificación de cianuro. A 28,77 g/t, el NaCN no solo deprimió el Fe, sino que también comenzó a deprimir la esfalerita, impidiendo su flotación y destruyendo la calidad del producto final.

A partir de estas apreciaciones, la dosificación óptima de NaCN no es un extremo, sino el punto central (19,18 g/t), que logra el mejor equilibrio entre deprimir el Fe, pero sin afectar al Zn.

4.3.2. Efecto de X2: Sulfato de cobre

Para el caso de la determinación óptima de CuSO_4 , se considera a este como el reactivo activador de la esfalerita. Para poder identificar su efecto, se han realizado dos comparaciones manteniendo constante X1, como se presenta, a continuación:

Tabla 13

NaCN constante en nivel bajo (14,39 g/t) en las pruebas 3 y 5

Prueba	Nivel de CuSO_4	Dosificación CuSO_4 (g/t)	Recuperación Zn (%)	Ley Concentrado Zn (%)
Prueba 5	Bajo	354,14	88,55	47,53
Prueba 3	Alto	641,56	86,10	45,63

Tabla 14

NaCN constante en nivel alto (23,98 g/t) en las pruebas 2 y 6

Prueba	Nivel de CuSO_4	Dosificación CuSO_4 (g/t)	Recuperación Zn (%)	Ley Concentrado Zn (%)
Prueba 6	Bajo	354,14	87,67	47,67
Prueba 2	Alto	641,56	87,85	44,79

Como se puede apreciar en las tablas 13 y 14, al aumentar el CuSO_4 al nivel máximo (641,56 g/t) resultaba en una disminución significativa de la Ley de Concentrado de Zn (45,63% y 44,79% en las pruebas 3 y 2, respectivamente). El mayor impacto se apreció en la comparación entre las pruebas 5 y 3, donde ocurrió un aumento en el activador CuSO_4 y esto provocó una caída del 2,45% en la recuperación. Esto confirma que al analizar el relave de la prueba 3, que reportó la Ley de Zn más alta en colas (1,48% Zn) de toda la serie de experimentos, indicando la mayor pérdida de Zn.

Al explicar lo anterior, coincide con una sobre-activación, donde el exceso de iones Cu^{+2} ha podido tener efectos perjudiciales en los cuales pudo haber activado la ganga, consumiendo colector y diluyendo el concentrado o, como segunda probable causa, haber tenido un efecto depresor en la esfalerita mediante mecanismos de adsorción complejos que inhiben la flotación eficiente del Zn.

4.4. ANÁLISIS INFERENCIAL

Se ha realizado un análisis de superficie de respuesta (RSM) basado en los ensayos para ajustar un modelo matemático cuadrático que permita predecir la respuesta (Recuperación o Ley) en función de X1 y X2.

Ecuación 1 (Modelo Cuadrático Teórico):

$$Y = \beta_0 + \beta_1(X_1) + \beta_2(X_2) + \beta_{11}(X_1^2) + \beta_{22}(X_2^2) + \beta_{12}(X_1X_2)$$

Donde: Y = Respuesta; X1 = NaCN, X2, CuSO₄.

4.4.1. Análisis del modelo para la recuperación de Zn (Recup_Zn_pct VS. NaCN_g/t; CuSO₄_g/t)

Se ajustó un modelo cuadrático completo para la variable Recup_Zn_pct en función de NaCN_g/t (Cianuro de Sodio) y CuSO₄_g/t (Sulfato de Cobre).

Tabla 15

Coefficientes codificados (Recup_Zn_pct)

Coefficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	91,431	0,292	312,84	0,000	
NaCN_g/t	0,530	0,239	2,22	0,157	1,00
CuSO ₄ _g/t	-0,567	0,207	-2,74	0,111	1,00
NaCN_g/t*NaCN_g/t	-1,760	0,413	-4,26	0,051	1,12
CuSO ₄ _g/t*CuSO ₄ _g/t	-3,447	0,310	-11,12	0,008	1,12
NaCN_g/t*CuSO ₄ _g/t	1,315	0,413	3,18	0,086	1,00

Tabla 16*Resumen del modelo (Recup_Zn_pct)*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,413318	98,65%	95,29%	92,99%

En términos del valor R-cuadrado (ajustado) = 95,29% se interpreta como sobresaliente, indicando que el modelo es capaz de explicar el 95,29% de la variabilidad en la recuperación de Zn. Adicionalmente, el R-cuad (pred) es alto y cercano al R-cuad. Ajustado, lo que permite inferir su alta capacidad predictiva.

Tabla 17*Análisis de Varianza (Recup_Zn_pct)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	25,0356	5,0071	29,31	0,033
Lineal	2	2,1257	1,0628	6,22	0,138
NaCN_g/t	1	0,8415	0,8415	4,93	0,157
CuSO ₄ _g/t	1	1,2842	1,2842	7,52	0,111
Cuadrado	2	21,1802	10,5901	61,99	0,016
NaCN_g/t*NaCN_g/t	1	3,0969	3,0969	18,13	0,051
CuSO ₄ _g/t*Cuso ₄ _g/t	1	21,1217	21,1217	123,64	0,008
Interacción de 2 factores	1	1,7297	1,7297	10,13	0,086
NaCN_g/t*Cuso ₄ _g/t	1	1,7297	1,7297	10,13	0,086
Error	2	0,3417	0,1708		
Falta de ajuste	1	0,0129	0,0129	0,04	0,876
Error puro	1	0,3288	0,3288		
Total	7	25,3772			

De acuerdo con el análisis de varianza (Tabla 17), se demuestra que el modelo de regresión es altamente significativo ($p = 0,033 < 0,05$), lo que demuestra que existe una relación fuerte entre las dosificaciones de los reactivos y la recuperación de Zn. Por lo tanto, se valida la hipótesis general con un 95% de confianza.

Adicionalmente, se menciona que la tabla ANOVA muestra una falta de ajuste debido a que su p valor fue de 0.0876. Dado que este valor es mucho mayor que

0,05, el resultado se califica como “excelente”. Lo anterior indica que el modelo cuadrático propuesto se ajusta adecuadamente a los datos experimentales y no omite términos importantes, lo cual permite validar la alta consistencia que tuvieron las réplicas del punto central (pruebas 7 y 8).

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Recup_Zn_pct} = & 53,04 + 0,314 \text{ NaCN_g/t} + 0,1439 \text{ CuSO}_4\text{/g/t} \\ & - 0,01913 \text{ NaCN_g/t} \cdot \text{NaCN_g/t} \\ & - 0,000167 \text{ CuSO}_4\text{/g/t} \cdot \text{CuSO}_4\text{/g/t} \\ & + 0,000954 \text{ NaCN_g/t} \cdot \text{CuSO}_4\text{/g/t} \end{aligned}$$

Figura 8

Pareto de efectos secundarios (Recup_Zn_pct)

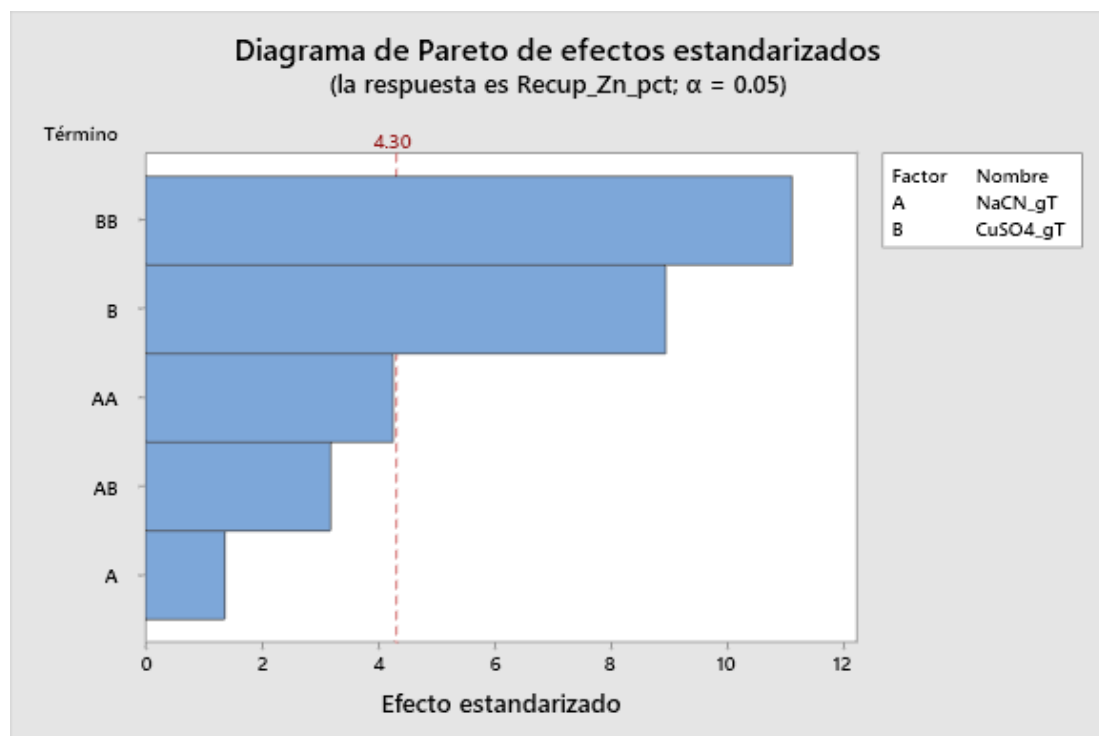


Figura 9

Gráficas de residuos (*Recup_Zn_pct*)



Con respecto a las gráficas de residuos, se evidencia la prueba de normalidad demuestra que los datos se ajustan a un comportamiento normal. Mientras que la varianza en el gráfico “vs. Ajustes” demuestra una dispersión aleatoria de los puntos alrededor de la línea cero, donde no se aprecian patrones de embudo o curva que permitan refutar que exista una varianza constante en los datos. Finalmente, los gráficos de “vs. Orden” no demuestran una tendencia, lo que indica que los errores son independientes entre sí.

4.4.2. Análisis del modelo para la recuperación de hierro (%) en el concentrado de Zn (*Recup_Fe_pct* vs *NaCN_g/t*: *CuSO₄_g/t*)

Se ajustó un modelo cuadrático completo para la variable *Recup_Fe_pct* en función de *NaCN_g/t* (Cianuro de Sodio) y *CuSO₄_g/t* (Sulfato de Cobre).

Tabla 18*Coefficientes codificados (Recup_Fe_pct)*

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	11,315	0,880	12,86	0,006	
NaCN_g/t	-0,352	0,718	-0,49	0,673	1,00
CuSO ₄ _g/t	-0,513	0,622	-0,82	0,497	1,00
NaCN_g/t*NaCN_g/t	-1,14	1,24	-0,91	0,458	1,12
CuSO ₄ _g/t*C _u SO ₄ _g/t	-1,714	0,933	-1,84	0,208	1,12
NaCN_g/t*C _u SO ₄ _g/t	0,19	1,24	0,15	0,895	1,00

Tabla 19*Resumen del modelo (Recup_Fe_pct)*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,2444	68,81%	0%	0%

En cuanto a los coeficientes resumen del modelo (Tabla 19), se revela la debilidad de este, donde el R-cuad. (ajustado) es de solo 0%. Más crítico aún, el R-cuad. (pred) es de 0,00%. Un R-cuadrado de predicción de 0% indica que el modelo no tiene ningún poder predictivo y está sobreajustado a los 8 puntos de datos. En esencia, no ha resultado estadísticamente significativo.

Tabla 20*Análisis de Varianza (Recup_Fe_pct)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	6,83388	1,36678	0,88	0,607
Lineal	2	1,42163	0,71082	0,46	0,685
NaCN_g/t	1	0,37101	0,37101	0,24	0,673
CuSO ₄ _g/t	1	1,05062	1,05062	0,68	0,497
Cuadrado	2	5,37803	2,68901	1,74	0,365
NaCN_g/t*NaCN_g/t	1	1,28823	1,28823	0,83	0,458
CuSO ₄ _g/t*Cuso ₄ _g/t	1	5,22123	5,22123	3,37	0,208
Interacción de 2 factores	1	0,03423	0,03423	0,02	0,895
NaCN_g/t*Cuso ₄ _g/t	1	0,03423	0,03423	0,02	0,895
Error	2	3,09727	1,54863		
Falta de ajuste	1	0,82882	0,82882	0,37	0,654
Error puro	1	2,26845	2,26845		
Total	7	9,93115			

A diferencia del modelo de recuperación (Recup_Zn_pct), la tabla de Análisis de Varianza para la Recup_Fe_pct muestra un Valor p = 0,607 para la fila "Modelo". Dado que $0,607 > 0,05$ el modelo en su conjunto no es estadísticamente significativo. Esto implica que no se puede validar la Hipótesis General (HG) para esta variable; el modelo no logra establecer una relación estadística robusta entre los factores y la selectividad medida por la Recuperación de Hierro.

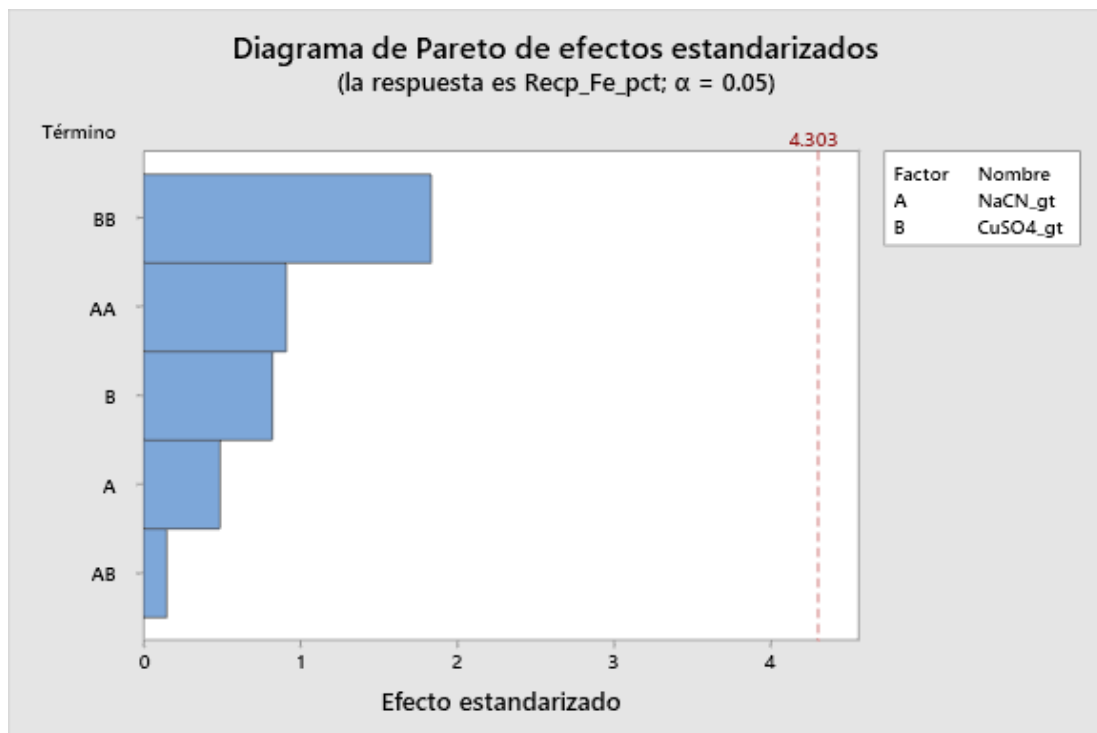
La prueba de "Falta de ajuste" arrojó un Valor p = 0.654. Este valor, al ser mayor que 0,05, es un resultado positivo, pues indica que el modelo se ajusta correctamente a los puntos de datos (es decir, no "carece de ajuste"). Esto se debe a la alta consistencia (bajo error puro) entre las réplicas (Pruebas 7 y 8).

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{Recp_Fe_pct} = & -10,0 + 0,370 \text{ NaCN_g/t} + 0,0765 \text{ CuSO}_4\text{/g/t} \\ & - 0,0123 \text{ NaCN_g/t*NaCN_g/t} \\ & - 0,000083 \text{ CuSO}_4\text{/g/t*CuSO}_4\text{/g/t} \\ & + 0,000134 \text{ NaCN_g/t*CuSO}_4\text{/g/t} \end{aligned}$$

Figura 10

Pareto de efectos secundarios (Recup_Fe_pct)



En el Pareto se visualiza la significancia de los factores. La línea roja de referencia está en 4.30321. Se observa que ninguna barra de factor (A, B, AA, BB, AB) la línea de significancia. Esto corrobora el Valor p de 0,607 de la Tabla ANOVA, confirmando que la Recuperación de Hierro no es estadísticamente explicada por el modelo cuadrático propuesto

Figura 11

Gráficas de residuos (Recup_Fe_pct)



4.4.3. Análisis de hipótesis específicas

En el caso de la hipótesis específica 1, para la Recup_Zn se aprecia que el efecto AA (efecto cuadrático de NaCN_g/t) es el tercer efecto más importante, cruzando también la línea de la significancia. La prueba ANOVA demuestra un efecto lineal (NaCN_g/t) no significativo ($p = 0,305$), sin embargo, el efecto cuadrático (NaCN_g/t*NaCN_g/t) tiene un valor $p = 0.051$. Aunque este valor es superior a 0,05, el diagrama Pareto lo identifica como significativo. Por lo tanto, se acepta la hipótesis acerca del hecho que el efecto del Cianuro de Sodio es significativo, y su impacto es de naturaleza cuadrática, lo que coincide con el análisis descriptivo que identificó un rendimiento deficiente en dosis altas (sobredosisificación).

En cuanto a la misma hipótesis, pero para la Recup_Fe_pct, el efecto lineal (NaCN_g/t, Factor A) y cuadrático (NaCN_g/t*NaCN_g/t) son no significativos ($p=0,673$ y $p = 0,458$, respectivamente). Por lo tanto, no existe evidencia suficiente para validar que el NaCN afecta la recuperación de hierro dentro del modelo.

Ahora bien, con respecto a la hipótesis específica 2, para la Recup_Zn el Pareto demostró que los efectos más grandes son el BB (efecto cuadrático de CuSO₄_g/t) y B (efecto lineal de CuSO₄_g/t). Con el análisis de varianza también se

confirma, debido a que el efecto lineal ($\text{CuSO}_4\text{_g/t}$) fue de $p = 0,011$ como su efecto cuadrático ($\text{CuSO}_4\text{_g/t}^2$) ($p = 0,008$) son altamente significativos. Por lo tanto, existe evidencia estadística para confirmar que se debe aceptar la hipótesis alterna que indica que la dosificación de CuSO_4 tiene un impacto estadístico crítico en la recuperación, y su efecto no es lineal sino curvo.

De igual manera, los efectos lineales ($\text{CuSO}_4\text{_g/t}$) y cuadrático ($\text{CuSO}_4\text{_g/t}^2$) resultaron no significativos ($p > 0,05$ en ambos casos). Dado dicho resultado, se puede rechazar la hipótesis nula para esta hipótesis con respecto al porcentaje de recuperación de hierro en este modelo.

4.5. COMBINACIÓN ÓPTIMA DE X1 y X2

El propósito es optimizar X1 y X2 para satisfacer los objetivos del proceso de recuperación de Zn y de hierro en el concentrado de Zn. Para ello, se establecieron las opciones de respuesta “maximizar” en ambas en el software Minitab.

Tabla 21

Parámetros de optimización

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Recup_Fe_pct	Máximo	8,35	12,38		1	1
Recup_Zn_pct	Máximo	86,1016	91,8366		1	1

Tabla 22

Solución de mejora en la Recup_Fe_pct y Recup_Zn_pct

Solución	NaCN_g/t	$\text{CuSO}_4\text{_g/t}$	Recup_Fe_pct Ajuste	Recup_Zn_pct Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	18,8894	481,882	11,3610	91,4383	0,833824

Tabla 23

Predicción de respuesta múltiple

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Recup_Fe_pct Ajuste	11,361	0,874	(7,600;15,122)	(4,818;17,904)
Recup_Zn_pct	91,438	0,290	(90,189;92687)	(89,265;93,611)

Nota. Valores de configuración de NaCN_g/t (18,8894) y $\text{CuSO}_4\text{_g/t}$ (481,882)

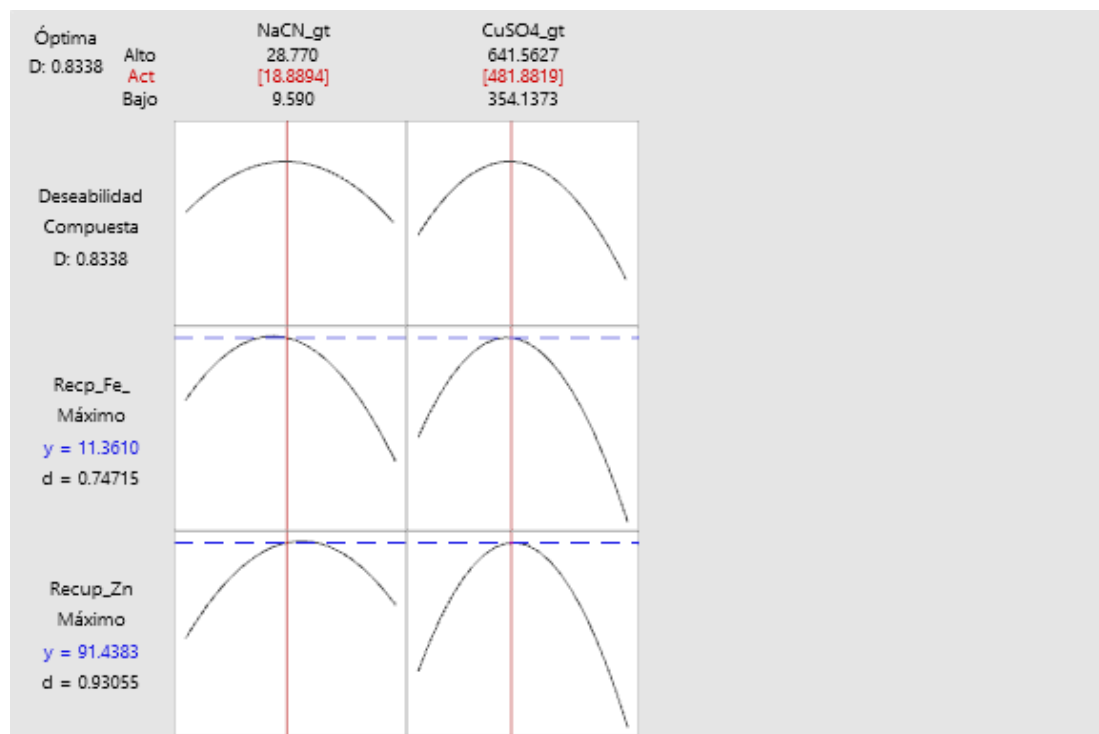
A través de la deseabilidad compuesta para todas las combinaciones de X1 y X2, se ha podido encontrar que la solución 1 representa el punto óptimo de operación dentro del rango experimental, donde se indica que:

- Dosificación de NaCN: 18,8894 g/t
- Dosificación de CuSO₄: 481,882 g/t

Bajo estas características, el modelo indica que el porcentaje de recuperación de hierro en el concentrado de zinc debe ser 12,38 y la recuperación de Zinc debe ser 91,8366%, con un factor de deseabilidad de 0,8338 que se encuentra cercano a 1, por lo que se considera una solución ideal.

Figura 12

Gráfico de optimización (*Recup_Zn_pct* y *Recup_Fe_pct*)



Con respecto al gráfico de optimización, se obtiene una representación visual de la validación, donde se evidencia una parábola invertida que indica que, en el caso de NaCN (X1) las dosificaciones óptimas se encuentran en el pico de la curva (18,3082 g/t). Mientras que la curva de CuSO₄ (X2) manifiesta un comportamiento similar con una parábola invertida, teniendo un pico de recuperación en 474,669 g/t.

4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los hallazgos de la investigación, orientada a "Determinar las condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc" en la planta San Jerónimo, se discuten a continuación en función de los objetivos planteados. El análisis experimental permitió establecer un conjunto de parámetros operativos precisos para un mineral complejo, caracterizado por su alta ley (11,11% Zn) y un elevado contenido de hierro (25,74% Fe). Por otro lado, Wei et al. (2021) alcanzaron que, la recuperación total de zinc alcanzó el 84,42%, combinando la flotación de minerales de sulfuro y óxido de zinc. A nivel industrial, se logró incrementar la recuperación operativa de zinc en el concentrado de óxidos en 19,52% en comparación con el proceso convencional. Además, el uso de un ambiente de pH reducido (pH = 9 en lugar de pH = 12) permitió disminuir el consumo de reactivos, reduciendo el costo total del proceso en 3,93 yuanes por tonelada de mineral.

Aunque, Du et al. (2021) obtuvieron que, en la etapa de lixiviación con agua, la recuperación de zinc fue del 38%, mientras que la de cobre alcanzó el 61%. Posteriormente, en la etapa de flotación, se obtuvo un concentrado con 12,26% de zinc, logrando una recuperación del 42,88%. En relación a lo mencionado anteriormente, Reyes et al. (2020) enfatizaron que, los reactivos de flotación desempeñan un papel crucial al modificar la superficie de los minerales para aumentar su hidrofobicidad o para estabilizar la espuma.

Mediante un diseño experimental hexagonal de ocho pruebas, se modeló la influencia de las variables independientes, dosificación de Cianuro de Sodio (NaCN) y Sulfato de Cobre (CuSO₄). El análisis de optimización de respuesta múltiple identificó una solución óptima con una deseabilidad compuesta de 0,833824, estableciendo las condiciones en 18,88 g/t de NaCN y 481,88 g/t de CuSO₄.

Bajo estas condiciones, el modelo predijo una capacidad de respuesta metalúrgica de 91,43% en la recuperación de zinc (Recup_Zn_pct) y 11,3610% en la recuperación de hierro en el concentrado de Zinc (Recup_Fe_pct). El análisis inferencial validó de forma robusta el modelo para la variable primaria de respuesta, la recuperación (Valor p = 0,033), con un R-cuadrado ajustado de 95,29%, confirmando que la hipótesis general era aceptable. Mientras que, Arias et al. (2024) enfatizaron en la generación masiva de residuos tanto líquidos como sólidos que albergan diversas variantes de este compuesto, por lo cual, la ciencia ha explorado el potencial de ciertos microorganismos para la degradación biológica.

Al contrastar estos resultados globales con los antecedentes, la recuperación de 91,4% se mostró altamente competitiva. Este valor superó el 88% de recuperación máxima reportado por Inga (2020) y el 83,78% alcanzado por Porras (2024). La comparación más relevante se establece con Vilela y López (2023), quienes lograron una recuperación superior 98,17% pero a expensas de una ley de concentrado significativamente menor (41,23%). En el presente estudio, la minimización de la Recuperación de Hierro (9,29%) implica una selectividad y calidad muy altas, un equilibrio superior dado el alto Fe de la muestra. Sin embargo, Feng et al. (2024) expresó que, la interacción en la interfaz mineral-reactivo es un fenómeno complejo que involucra mecanismos de atracción electrostática, puentes de hidrógeno y quimisorción entre los grupos funcionales del depresor (como carboxilos o sulfonilos) y los cationes metálicos de la superficie mineral.

Desde la perspectiva teórica, la metodología del estudio se alinea con los principios de investigación aplicada (Arias y Covinos, 2021) y el modelado de superficie de respuesta, una técnica también empleada por Inga (2020), para explicar los fenómenos del proceso. La generación de un modelo predictivo robusto (R-ajustado = 95,29%) se enmarca en la teoría de optimización de procesos (Pérez et al., 2022).

Además, la optimización en su conjunto cumple con el pilar de sostenibilidad que postula la "optimización de los procesos para reducir la generación de residuos", ya que maximizar la recuperación de metal valioso minimiza su pérdida en los relaves, un principio clave en el cumplimiento de las normativas ambientales peruanas (Echevarria y Samaniego, 2020).

Este hallazgo confirma la hipótesis general, demostrando que fue posible establecer un conjunto de parámetros óptimos para la capacidad de respuesta del sistema, logrando una recuperación competitiva (91,4%) frente al estándar de la planta (93%) a pesar de la mineralogía significativamente más compleja. Zhang et al. (2024) indicó que se aplicó el método de dilución seriada en agar YPD, incubando a 37 °C por 24 horas, y la eficacia del tratamiento se determinó mediante el recuento de colonias y su posterior conversión a valores logarítmicos.

En relación con el primer objetivo específico, "Identificar la dosificación óptima del colector Cianuro de sodio", los resultados revelaron una relación no lineal crítica

entre este reactivo y la capacidad de respuesta del sistema. El objetivo utilizó el NaCN como depresor de minerales de hierro, lo cual era esencial dado el alto contenido de 25,74% Fe.

El análisis descriptivo evidenció que una dosis alta (28,77 g/t) provocaba un colapso en la ley del concentrado (de 47,48% en el punto central a 41,99%), fenómeno identificado como "sobredosificación". El análisis inferencial corroboró este comportamiento cuadrático, mostrando que el término $\text{NaCN}_{\text{g/t}} \cdot \text{NaCN}_{\text{g/t}}$ era estadísticamente significativo para la recuperación (Valor $p = 0,051$). El optimizador de respuesta estableció la dosificación óptima en 18,3082 g/t. Por otro lado, Ma et al. (2021) indicaron que, lograron optimizar el consumo de agentes activadores y depresores (Na_2S y Na_2SiO_3) y el incremento en la dosificación de los colectores potencia la recuperación, esto ocurre a expensas de la ley de zinc.

El enfoque de este estudio en el NaCN como variable crítica para un mineral con alto contenido de hierro difiere de varios antecedentes nacionales que se centraron en otros reactivos, como los colectores (Condor y Huaman, 2021) o el sulfato de zinc (Porrás, 2024). Sin embargo, el principio del hallazgo es plenamente congruente con la conclusión de Porrás (2024), quien, a pesar de usar un depresor distinto, también determinó que una reducción controlada del mismo era fundamental para "minimizar la activación indeseada de pirita" y así mejorar la calidad del concentrado. La observación de que 28,77 g/t de NaCN fue excesivo en el presente estudio respalda directamente esa conclusión.

Teóricamente, los resultados validan de forma robusta el principio químico de la depresión selectiva en la flotación. El fenómeno de "sobredosificación" confirma la teoría de Escobedo et al. (2023) de que un exceso de agente depresor (NaCN) deja de ser selectivo y comienza a deprimir también el mineral valioso (esfalerita), además de la ganga (pirita).

Este hallazgo es relevante para la sostenibilidad, pues demuestra que el uso excesivo de un reactivo regulado como el cianuro no solo incrementa el riesgo ambiental y el costo, sino que es metalúrgicamente perjudicial. La optimización de su uso se alinea con las normativas peruanas sobre manejo de efluentes (Echevarría y Samaniego, 2020). Para ello, se hace imprescindible el tratamiento adecuado de las aguas residuales, asegurando la eliminación de contaminantes antes de su descarga, y una gestión cuidadosa de los relaves para prevenir la contaminación del suelo y del agua. La optimización de los procesos para reducir la generación de residuos es otra

estrategia clave, buscando maximizar la recuperación de minerales y disminuir los desechos.

La adopción de estándares de minería responsable favorece prácticas éticas y sostenibles, mientras que el reciclaje y reutilización de agua en las operaciones mineras disminuyen la demanda de recursos hídricos. Finalmente, esto valida la hipótesis específica, confirmando que existía una dosificación óptima y que su impacto en el sistema era de naturaleza cuadrática.

Respecto al segundo objetivo específico, "Determinar la dosificación óptima del sulfato de cobre", los hallazgos demostraron que este factor fue el impulsor estadístico más significativo para la variable de respuesta primaria, la recuperación. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó una alta significancia tanto para el término lineal (Valor $p = 0,012$) como para el término cuadrático (Valor $p = 0,008$) del CuSO_4 . Este fuerte efecto cuadrático validó la observación descriptiva de la "sobre-activación": la dosificación más alta (641,56 g/t) fue perjudicial, lo que resultó en mayor pérdida de zinc en el relave (1,48% Zn en la prueba 3), lo que validó el principio de sobre-activación de la ganga de pirita. El optimizador de respuesta identificó el pico de esta curva de recuperación en 481,882 g/t.

Este resultado óptimo presenta una notable convergencia con los antecedentes nacionales. El valor es casi idéntico a los 500 g/t de CuSO_4 determinados por Vilela y López (2023) en su investigación sobre minerales de alta pureza (alta ley) en Áncash, lo que confiere una sólida validación externa al hallazgo. Si bien el resultado difiere de los 351,06 g/t reportados por Inga (2020), esta divergencia es coherente. El mineral de la presente investigación (11,11% Zn), al poseer una ley de cabeza más alta, requería estequiométricamente una mayor cantidad de activador para lograr una activación completa de la superficie de esfalerita disponible, en comparación con el mineral de menor ley presumiblemente estudiado por Inga (2020).

Teóricamente, los resultados ilustran perfectamente los principios fisicoquímicos de la activación de la esfalerita. La teoría de flotación (Suca y Palomino, 2022) indica que el CuSO_4 es necesario para que la esfalerita se vuelva hidrofóbica. La baja recuperación confirma un estado de sub-activación, donde no había suficientes iones Cu^+ para activar la gran superficie mineral. Inversamente, el colapso de la recuperación a 641,56 g/t (86,98% promedio) valida la teoría de sobre-activación. Este exceso de iones Cu^+ probablemente co-activó la abundante ganga

de pirita (25,74% Fe), la cual compitió por el colector, un riesgo advertido en las teorías de control de procesos (Gómez et al., 2021).

Para finalizar, se validó la hipótesis específica al demostrar que el efecto de este activador es fuertemente cuadrático ($p = 0,008$). Este valor representa el equilibrio preciso entre maximizar la activación de la esfalerita y prevenir la costosa co-activación de la pirita. Por lo tanto, Mederski et al. (2022) afirmó que, la pirita como el sulfuro de mayor prevalencia en la corteza terrestre, con una presencia ubicua que abarca desde formaciones sedimentarias y magmáticas hasta complejos metamórficos.

CONCLUSIONES

Con respecto a las condiciones óptimas en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la Planta Concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca, se determinaron las condiciones óptimas de flotación del mineral complejo de zinc mediante la Metodología de Superficie de Respuesta, estableciéndose como valores óptimos 18,88 g/t de NaCN y 481,88 g/t de CuSO_4 , con los cuales se alcanzó una recuperación de zinc de 91,39% y un contenido de hierro en el concentrado de 9,29%, evidenciando una mejora significativa en la selectividad del proceso. Además, la interacción entre NaCN y CuSO_4 es determinante en el proceso, presentando un efecto conjunto significativo que condiciona la recuperación de zinc, lo que demuestra que la optimización depende de la relación entre ambos reactivos más que de su dosificación individual y el modelo estadístico presentó un alto nivel de ajuste (R^2 ajustado = 95,29%), validando la confiabilidad del diseño experimental y confirmando la eficacia de la metodología empleada para la optimización del proceso.

En cuanto a la dosificación óptima del depresor cianuro de sodio en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca, se comprobó que la dosificación de cianuro de sodio influye de manera significativa y no lineal en la recuperación de zinc, actuando como depresor de sulfuros de hierro en niveles óptimos, pero generando pérdida de selectividad cuando se aplica en exceso, esto permite asumir que la dosis de 9,59 g/t era insuficiente como depresor, permitiendo que el Fe flotara, consumiera reactivos y diluyera el concentrado, afectando la recuperación de Zn y con 28,77 g/t, el NaCN no solo deprimió el Fe, sino que también comenzó a deprimir la esfalerita, impidiendo su flotación y destruyendo la calidad del producto final.

En relación a la dosificación óptima del sulfato de cobre en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca, se evidenció que, el sulfato de cobre mostró un efecto positivo como activador de la esfalerita en rangos controlados; sin embargo, su sobredosificación favorece la activación de minerales no deseados, reduciendo la calidad del concentrado, esto confirma que al analizar el relave de la prueba 3, que reportó la Ley de Zn más alta en colas (1,48% Zn) de toda la serie de experimentos, indicando la mayor pérdida de Zn y coincide con una sobre-activación, donde el exceso de iones Cu^{+2} ha podido tener efectos perjudiciales en los cuales pudo haber

activado la ganga, consumiendo colector y diluyendo el concentrado o, como segunda probable causa, haber tenido un efecto depresor en la esfalerita mediante mecanismos de adsorción complejos que inhiben la flotación eficiente del Zn.

RECOMENDACIONES

En cuanto a las condiciones óptimas en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la Planta Concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca, se recomienda a la Planta Concentradora San Jerónimo validar a escala piloto o industrial las condiciones óptimas determinadas (18,88 g/t de NaCN y 481,88 g/t de CuSO_4), con el fin de confirmar su aplicabilidad en operación real y su impacto en la recuperación de zinc.

En relación a la dosificación óptima del depresor cianuro de sodio en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca, se recomienda implementar un control preciso de la dosificación de reactivos, debido a la alta sensibilidad del proceso frente a variaciones en NaCN y CuSO_4 , priorizando sistemas de monitoreo y ajuste continuo y desarrollar estudios complementarios que incluyan otras variables operativas, como pH, tiempo de flotación y dosificación de colectores, para lograr una optimización integral del proceso.

Con respecto a la dosificación óptima del sulfato de cobre en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca, se recomienda evaluar estrategias de reducción y optimización del consumo de reactivos, orientadas a disminuir costos operativos y minimizar el impacto ambiental del proceso de flotación y aplicar la metodología de superficie de respuesta en otros minerales complejos, a fin de validar su utilidad como herramienta de optimización en diferentes contextos metalúrgicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aramburú, V., Calderón, J., Adama, A., Ortiz, J., Gutiérrez, L., & Quispe, L. (2022). Modelo matemático para la recuperación de oro y zinc mediante el proceso de flotación a partir de minerales sulfurados de zinc marmatítico en la provincia de Casma – Ancash. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 25(50), 461–469. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24273>
- Arias, J., & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Enfoques Consulting EIRL. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- Arias, V., Lovera, D., Molina, I., & Sánchez, T. (2024). Degradación de cianuro en efluente de lixiviación de minerales auríferos, mediante *Pseudomonas pseudoalcaligenes* nativas. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 27(54), e27346. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v27i54.27346>
- Barrientos, J., Quispe, L., Aramburú, V., Ortiz, J., Quispe, R., Tiburcio, R. M., & Choque, W. (2024). Evaluación para incrementar la recuperación y calidad de concentrado de zinc en la flotación polimetálica en el distrito de Yarusyacán, Cerro de Pasco. *Industrial Data*, 27(1), 7–23. <https://doi.org/10.15381/idata.v27i1.23709>
- Condor, C., & Huaman, S. (2021). *Evaluación metalúrgica para elegir el colector óptimo en la flotación de zinc en minerales polimetálicos en la unidad minera Alpamarca* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10058>
- Cuesta, G., Guazhizaca, C., Zabala, K., Cazar, E., & Mejía, M. (2024). *Alternativas de Reactivos Lixiviantes al Cianuro de Sodio en Minerales con Asociaciones Auríferas llevados en procesos Hidrometalúrgicos Revisión Literaria*. 9(8), 1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.23857/pc.v9i8.7692>
- Echevarria, J., & Samaniego, M. (2020). *Implementación de un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo según la norma internacional ISO 45001 para la planta concentradora Huari-UNCP* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5908>

- Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe, A., Bello, S., & Alonso, O. (2022). Comportamiento de flotación y mecanismos de interacción entre la anglesita e hidroxamatos. *EPISTEMUS*, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.182>
- Escobedo, G., Lovera, D., Bustinza, V., & Ascuña, V. (2023). Optimización en la recuperación y calidad de concentrados de plata de la minera Pasivos Ambientales. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 26(51), e24706. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24706>
- Fajdek-Bieda, A., Perec, A., & Radomska-Zalas, A. (2023). Application of RSM Method for Optimization of Geraniol Transformation Process in the Presence of Garnet. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 2689. <https://doi.org/10.3390/ijms24032689>
- Feng, Q., Yang, W., Chang, M., Wen, S., Liu, D., & Han, G. (2024). Advances in depressants for flotation separation of Cu-Fe sulfide minerals at low alkalinity: A critical review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2709-3>
- Gachúz, J. (2022). Comercio e inversión de China en el sector minero de Chile, Perú y Bolivia. *Interacción Sino-Iberoamericana / Sino-Iberoamerican Interaction*, 2(1), 43–65. <https://doi.org/10.1515/sai-2022-0001>
- García, C. (2023). *Determinación de la relación óptima de longitud—Diámetro (L/D) en base a la evaluación paramétrica operativa en una columna de flotación, para minerales de Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C.* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/f6f823f5-4f50-4ea9-b482-9bd6297d77fe>
- García, G., & Paucar, J. (2023). *Separación de cobre y molibdeno a partir de minerales porfiríticos con recubrimientos de iones de Fe²⁺ y fosfato en la empresa minera Chinalco* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10044>
- Gómez, J., Rios-Campos, C., Puma, M., Huanaco, Y., Hubeck, J., Pantaleón, A. J. S., González, J. E. R., & Condori, F. R. H. (2021). Impacto económico de la minería en el Perú: Economic impact of mining in Peru. *South Florida Journal of Development*, 2(5), 6382–6402. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n4-009>
- González, R., Gallego, I., Cazorla, M., Fuentes, F., Bonachela, S., & Casas, J. (2021). Efectos del tratamiento con sulfato de cobre (CuSO₄) sobre la calidad del

agua de balsas de riego. *Research Gate*, 1(1).
https://www.researchgate.net/publication/308336236_Efectos_del_tratamiento_con_sulfato_de_cobre_CuSO4_sobre_la_calidad_del_agua_de_balsas_de_riego

- Gregory, C., David, C., Jenny, G., & Chicaiza, Á. (2020). Recuperación de minerales aurífero mediante flotación, provenientes del sector la Panguí, distrito minero Chinapintza – Ecuador. *ConcienciaDigital*, 3(2,1), 80–93.
<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i2.1.1221>
- Hernández Lavalle, L., Rojas, J., Arellano, L., Martínez, V., & Martínez, D. (2023). Remoción de zinc a partir de un efluente sintético por electrodiálisis. *EPISTEMUS*, 17(34), 115–122.
<https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.266>
- Inga, A. (2020). *Optimización en la recuperación de zinc de minerales polimetálicos mediante el proceso de flotación en la empresa Mines and Metals Trading Perú—Huancavelica* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/15703>
- Inga, A., Aramburú, V., & Tiburcio, R. (2020). Optimización en la Recuperación de Zinc de minerales polimetálicos mediante el proceso de flotación en la empresa Mines and Metals Trading Perú—Huancavelica. *ResearchGate*, 23(2), 1–14. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15381/idata.v23i2.16632>
- Ma, Z., Wang, L., Ni, X., Liao, Y., & Liang, Z. (2021). Zinc Recovery from Wulagen Sulfide Flotation Plant Tail by Applying Ether Amine Organic Collectors. *Molecules*, 26(17), 5365. <https://doi.org/10.3390/molecules26175365>
- Mateos, M. (2020). *Efecto de la salinidad en la flotación de esfalerita y marmalita* [Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. <https://tesisdigitales.umich.mx/server/api/core/bitstreams/2c60f96f-8a84-4eb1-a59b-84337df506a8/content>
- Mederski, S., Pršek, J., Majzlan, J., Kiefer, S., Dimitrova, D., Milovský, R., Koch, C. B., & Koziń, D. (2022). Geochemistry and textural evolution of As-Tl-Sb-Hg-rich pyrite from a sediment-hosted As-Sb-Tl-Pb ± Hg ± Au mineralization in Janjevo, Kosovo. *Ore Geology Reviews*, 151, 105221.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105221>
- Medina, M., Rojas, R., Bustamante, W., Loaiza, R., Martel, C., & Castillo, R. (2023). *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación* (1a

- ed.). Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú.
<https://doi.org/10.35622/inudi.b.080>
- Miranda, L. (2022). *Recuperación de zinc a partir de residuos mineros mediante biolixiviación por bacterias acidófilas y electroobtención* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/82327/1020766900.2022.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Monga, I., Paul, V., Muniyasamy, S., & Zinyemba, O. (2022). Green Synthesis of Sodium Cyanide Using Hydrogen Cyanide Extracted under Vacuum from Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Leaves. *Sustainable Chemistry*, 3(3), 312–333. <https://doi.org/10.3390/suschem3030020>
- Ordoñez, Á., & Alfaro, E. (2023). Recuperación de cobre, zinc, oro y plata desde minerales polimetálicos por lixiviación en solución oxidante amoniacal. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 26(51), e25263.
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25263>
- Patzi, C. (2019). *Recuperación de minerales de cobre por flotación a partir del mineral procedente del Yacimiento Chacarilla-La Paz* [Tesis de Pregrado, Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/32631>
- Pérez, M., Da Silva, A., Toledo, M., & Segura, D. (2022). Simulación de una Práctica de Fluidización para el Laboratorio de Procesos de Separación de la Universidad Metropolitana. *Tekhné*, 25(2), 1–21.
- Porras, J. (2024). *Evaluación metalúrgica del blending del mineral relave antiguo/tajo norte para incrementar la recuperación del plomo—Zinc en la planta concentradora “Alpamarca”* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/11521/T010_70902488_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reyes, M., Reyes, I., Flores, M., Barrientos, F., Pérez, M., & Juárez, J. (2020). El papel depresor del pH durante la flotación sin colector de mineral de galena. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 7(7), 55–61.
<https://doi.org/10.29057/aactm.v7i7.6201>
- Rodríguez, C., Salas, G., Baltazar, J., Valtierra, J., & Alonso, O. (2022). Consumo de cianuro de concentrado de pirita aurífera empleando ozono como

- pretratamiento. *Epistemos*, 15(31).
<https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i31.194>
- Rojas, J., & Chaca, B. (2023). *Efecto de la dosificación del NaCN y tiempo de flotación para la recuperación de Cobre del Mineral Blending – Minera Perú Sol S.A.C. – Oroya 2022*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/3690/1/T026_70766568_T.pdf
- Sempertegui, L. (2023). *Recuperación de zinc proveniente de polvos de acería usando solventes eutécticos profundos (DES): Recuperación de zinc proveniente de polvos de acería usando como agente lixivante el DES relina (Urea + Cloruro de colina)*. [Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/24858/1/CD%2013534.pdf>
- Sinche-Gonzalez, M., & Fornasiero, D. (2021). Understanding the effect of sulphate in mining-process water on sulphide flotation. *Minerals Engineering*, 165, 106865. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106865>
- Siqueira, M. (2021). *Diseño de una planta de flotación para la obtención de mica* [Tesis de Fin de Máster, Universitat Jaume]. <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/196176>
- Song, Z., Wen, S., Han, G., & Feng, Q. (2023). Recent Progress on Chelating Reagents in Flotation of Zinc Oxide Ores: A Review. *Mdpi*, 13(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/min13101278>
- Suca, J., & Palomino, G. (2022). Optimización del proceso de flotación para la recuperación de un preconcentrado de oro en minerales sulfurados. *Technological Innovations Journal*, 1(1), 23–40. <https://doi.org/10.35622/j.ti.2022.01.002>
- Tamayo, D., Martínez, A., Soria, M., & Carrillo, F. (2022). Extracción de ree de un mineral rico en óxidos de hierro. *EPISTEMUS*, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i31.204>
- Torres, J., Mejía, D., Moreyra, P., Oré, J., & Oscoco, S. (2021). Geometalurgia y el futuro de la minería digital en el Perú. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(47), 163–179. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20661>
- Valencia, F., & Calle, A. (2023). *Obtención de sulfuros de zinc de una mena polimetálica mediante flotación selectiva en la mina Cristian David, Pasaje—*

- El Oro* [Tesis de Pregrado, Universidad del Azuay].
<https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13267>
- Veza, I., Spraggon, M., Fattah, I., & Idris, M. (2023). Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition. *Results in Engineering*, 18, 101213. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101213>
- Vilela, J., & López, O. (2023). *Diseño para la recuperación de zinc en minerales sulfurados de alta ley mediante el proceso de flotación en el departamento de Ancash* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
<https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/20368>
- Vízcaíno, P., Cedeño, R., & Maldonado, I. (2023). Metodología de la investigación científica: Guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 1–40. https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658
- Zárate, R., Vélez, C., & Caballero, J. (2020). La industria extractiva en América Latina, su incidencia y los conflictos socioambientales derivados del sector minero e hidrocarburos. *Revista Espacios*, 41(24), 154–167.
- Zargari, A., Nejatian, M., Abbaszadeh, S., Jahanbin, K., Bagheri, T., Hedayati, A., & Sheykhi, M. (2023). Modulation of toxicity effects of CuSO₄ by sulfated polysaccharides extracted from brown algae (*Sargassum tenerrimum*) in *Danio rerio* as a model. *Scientific Reports*, 13(1), 11429. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38549-0>
- Zhang, M., An, Q., Wang, Y., Ye, S., & Zhu, X. (2024). Copper Sulfate Combined with Photodynamic Therapy Enhances Antifungal Effect by Downregulating AIF1. *Journal of Fungi*, 10(3), 213. <https://doi.org/10.3390/jof10030213>


ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc de la planta concentradora San Jerónimo - Ayacucho.

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>General</p> <p>¿Cuáles son las condiciones óptimas en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina?</p>	<p>General</p> <p>Determinar las condiciones óptimas en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la Planta Concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca.</p>	<p>General</p> <p>Si se determinan las condiciones óptimas, entonces se optimizará la recuperación de zinc en el proceso de flotación de la planta concentradora San Jerónimo.</p>	<p>Dependiente</p> <p>Recuperación de zinc en el proceso de flotación (%)</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>Aplicada</p> <p>Nivel de la investigación</p> <p>Explicativa</p>
<p>Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es la dosificación del depresor cianuro de sodio en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina? ¿Cuál es la dosificación del sulfato de cobre en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca? 	<p>Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar la dosificación óptima del depresor cianuro de sodio en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca. Determinar la dosificación óptima del sulfato de cobre en la recuperación de zinc en el proceso de flotación (%) de la planta concentradora San Jerónimo de la Unidad Minera Catalina Huanca. 	<p>Específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> Si se determina la dosificación óptima del cianuro de sodio, entonces se optimizará la recuperación de zinc en el proceso de flotación de la Planta Concentradora San Jerónimo. Si se determina la dosificación óptima del sulfato de cobre, entonces se optimizará la recuperación de zinc en el proceso de flotación de la Planta Concentradora San Jerónimo. 	<p>Independiente</p> <p>Dosificación de cianuro de sodio</p> <p>Dosificación de sulfato de cobre</p>	<p>Muestra</p> <p>Estuvo constituido por el compósito representativo en la Planta Concentradora “San Jerónimo” de la Unidad Minera Catalina Huanca, Ayacucho en el año 2025.</p>

Anexo 3. Ensayos de laboratorio

	MINERALS OF LABORATORIES S.R.L.		Contratante: SOCIEDAD MINERA CATALINA HUANCA S.A.C.
	PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE GEOLOGÍA		
	ÁREA: LABORATORIO QUÍMICO Código: ML-SIG-PRT-005	Versión: 01 Página 1/ 3	





- 1. ALCANCE:**
 - 1.1. El presente procedimiento se aplica a todo el personal del Laboratorio MINLAB S.R.L. autorizado en la preparación de las muestras procedentes de mina y geología.


- 2. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL**
 - 2.1 Overol con cinta reflectiva
 - 2.2 Traje tipo tyvex (usar si la actividad es programada partir de 30 min interrumpidos)
 - 2.3 Casco
 - 2.4 Respirador media cara.
 - 2.5 Cartuchos para gases
 - 2.6 Filtros par polvo
 - 2.7 Guantes de nitrilo
 - 2.8 Guantes de badana
 - 2.9 Lentes de protección.
 - 2.10 Tapones auditivos y/o Orejeras.
 - 2.11 Zapatos de seguridad.

- 3. EQUIPO / HERRAMIENTAS / MATERIALES**
 - 3.1 Mesa de cuarteo
 - 3.2 Bandejas de aluminio o acero inoxidable con capacidad de 3 a 5kg
 - 3.3 Bolsas plásticas de 10 x 15 x 2
 - 3.4 Bolsas de polietileno de 10 x 5.
 - 3.5 Papel Kraft
 - 3.6 Plumón indeleble **color negro.**
 - 3.7 Estufa de secado
 - 3.8 Chancadora de quijada primaria.
 - 3.9 Chancadora Rhyno
 - 3.10 Pulverizador de anillos
 - 3.11 Extractor de polvos.
 - 3.12 Compresor de aire.
 - 3.13 Cuarteador Rifles J.
 - 3.14 **Brocha**
 - 3.15 **Pistolas de aire**
 - 3.16 **Gancho de fierro**

- 4. PROCEDIMIENTO**
 - 4.1 Ingreso de las muestras:**
 - 4.1.1 Las muestras de geología que ingresan son contabilizados y registrados en el formato general de ingreso de muestras ML-CAL-FOR-018, donde se registra según número de orden para muestras formadas por un código de geología en orden correlativo.
 - 4.1.2 Una vez generado la orden codificar las bolsas 10 x 5 con código de barras o plumón indeleble.

 - 4.2 Secado de muestras**

PREPARADO POR:	REVISADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
			
Supervisor de Área	Jefe de Laboratorio o Responsable de Área	Gerente de Operaciones	Gerente General
Fecha de Elaboración: 8/01/2025			Fecha de Aprobación: 10/01/2025

	MINERALS OF LABORATORIES S.R.L.		Contratante: SOCIEDAD MINERA CATALINA HUANGA S.A.C.
	PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE GEOLOGÍA		
	ÁREA: LABORATORIO QUÍMICO Código: ML-SIG-PRT-005	Versión: 01 Página 2/ 3	

4.2.1 Retirar los precintos de las bolsas con muestra.

4.2.2 Vaciar la totalidad de las muestras sobre bandejas cubierta con papel kraft.

4.2.3 Extender la muestra sobre área total de la bandeja, utilizando una espátula y colocar la etiqueta en la bandeja con muestra en lugar visible.

4.2.4 Secar las muestras a temperatura de 105°C +/- 5°C; hasta peso constante.

4.2.5 Retirar y enfriar a temperatura ambiente.

4.3 Chancado primario.

4.3.1 Antes de hacer uso del equipo (chancadora de quijada), verificar que esté en buen estado de funcionamiento los blindajes móvil, fijo y **engrasado**.

4.3.2 Encender el extractor de polvos.

4.3.3 Encender la chancadora de quijada.

4.3.4 Alimentar gradualmente la muestra, para no sobrecargar y evitar el atoramiento, hasta reducir el tamaño de la muestra a malla -1/4".

4.3.5 Limpiar la quijada de la chancadora con aire comprimido por cada muestra chancada.

4.3.6 En caso de atoramiento apagar la máquina y utilizar ganchos de fierro para retirar partículas atascadas.

4.3.7 Una vez terminada la trituración se debe realizar una limpieza completa a las zonas de carga y descarga de la chancadora de quijada.

4.4 Chancado secundario

4.4.1 Antes de usar el equipo de trituración secundaria (chancadora de quijadas Rhyno), verificar que dicho equipo esté en buen funcionamiento y engrase.

4.4.2 **Verificar que el extractor de polvos y compresor de aire comprimido estén funcionando en forma correcta.**

4.4.3 Encender la chancadora de quijada Rhyno.

4.4.4 Alimentar en forma gradual la muestra, para no sobrecargar y evitar el atoramiento, hasta reducir el tamaño de la muestra 2.00 mm

4.4.5 Limpiar la quijada de la chancadora con aire comprimido y muestra estéril por cada 5 muestras chancadas.

4.4.6 Al inicio y a la mitad de la operación, realizar el control granulométrico utilizando malla 10 ASTM; con el fin de verificar el 90% pasante, registrar en el formato ML-CAL-FOR-022.





4.4.7 En caso de atoramiento apagar la máquina y utilizar ganchos de fierro para retirar partículas atascadas.


4.4.8 Una vez terminada la trituración se debe realizar una limpieza completa a las zonas de carga y descarga de la chancadora quijada, haciendo uso de trapo industrial, brocha y aire comprimido.

4.5 Cuarteo de muestras.

4.5.1 Antes de hacer uso del divisor de sólidos Riffles Jones, el operador debe asegurarse que el extractor de polvos y compresor de aire comprimido estén funcionando en forma correcta.

4.5.2 Revisar el cuarteador si presenta presencia de sólidos incrustadas en las canaletas o residuos de partículas finas; en caso que presentara se limpia con aire comprimido y trapo industrial.

PREPARADO POR:	REVISADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
			
Supervisor de Área	Jefe de Laboratorio o Responsable de Área	Gerente de Operaciones	Gerente General
Fecha de Elaboración: 8/01/2025			Fecha de Aprobación: 10/01/2025

	MINERALS OF LABORATORIES S.R.L.		Contratante: SOCIEDAD MINERA CATALINA HUANCA S.A.C.	
	PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE GEOLOGÍA			
	ÁREA: LABORATORIO QUÍMICO Código: ML-SIG-PRT-005	Versión: 01 Página 3/ 3		

4.5.3 Realizar el cuarteo de la muestra; vertiendo en la línea central del cuarteador Riffles Jones. La muestra se dividirá en dos porciones equivalentes, tomar la bandeja de primera división y seguir el proceso de cuarteo hasta obtener un peso promedio de +/- 100g.

4.5.4 La muestra de 100g retornar a la bandeja original, para su pulverizado posterior.

4.6 Pulverizado de muestras:

4.6.1 Antes de hacer uso del pulverizador, el operador debe asegurarse que el extractor de polvos, compresor de aire comprimido estén funcionando en forma correcta.

4.6.2 Revisar las ollas de pulverizado que estén limpias y codificadas para uso exclusivo en Poner en funcionamiento el pulverizador por un tiempo promedio de **60** segundos por muestra.

4.6.3 Terminado el tiempo de pulverizado se apaga automáticamente, se retira la olla conteniendo muestra, se abre la tapa y se vierte sobre papel kraff de 30 x 30cm. Esta muestra trasvasar a una bolsa de polietileno 10 x 5 luego homogenizar enérgicamente y colocar en un sobre previamente codificada.

4.6.4 Se realiza la limpieza de la olla de pulverizado con aire comprimido; luego se agrega material estéril libre de contaminación de metales o sílice y se pulveriza por tiempo de 5 segundos aproximadamente y se limpia con aire comprimido.

4.6.5 Por cada lote de muestras de geología que se pulvericen se realizará el control de mallas al inicio y a la mitad de la operación; registrar en el formato ML-CAL-FOR-023 para verificar el porcentaje en peso de malla -140 (95%).





5. RESTRICCIONES

5.1 Se prohíbe estrictamente trabajar en el área sin los EPPs necesarios.

5.2 Se prohíbe estrictamente desechar los residuos generados en lugares no autorizados.

5.3 Se prohíbe estrictamente pulverizar sin cerrar el capsulado anti ruido.

5.4 Queda prohibido usar equipo en mal estado.

PREPARADO POR:	REVISADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
			
Supervisor de Área	Jefe de Laboratorio o Responsable de Área	Gerente de Operaciones	Gerente General
Fecha de Elaboración: 8/01/2025			Fecha de Aprobación: 10/01/2025

Anexo 4. Análisis de ley de cabeza



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

N° de Orden : MT - 250803 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 10-08-25
 Fecha de Reporte : 11-08-25
 N° de Muestras : 1

ANALISIS DE LEY DE CABEZA DE LA MUESTRA ESPECIAL (MUESTRA DE TESIS - MT)

ITEM	CODIGO	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	MUESTRA ESPECIAL - MT	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84

NOTA: La gravedad específica se realizó por el método de la fiola



Anexo 5. Análisis granulométrico

Malla ASTM N°	Abertura (µm)	Tiempo (Minutos)			Tiempo (Minutos)			Tiempo (Minutos)		
		3,00			6,00			10,00		
		Peso, g	Retenido %	Acumulado Pasante, %	Peso, g	Retenido %	Acumulado Pasante, %	Peso, g	Retenido %	Acumulado Pasante, %
		0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0
		0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0
6	3350	0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0
10	2000	0,20	0,04	100,0	0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0
20	850	4,80	0,96	99,0	0,30	0,06	99,9	0,00	0,00	100,0
30	600	6,85	1,37	97,6	0,45	0,09	99,9	0,00	0,00	100,0
50	300	45,00	9,00	88,6	6,30	1,26	98,6	1,05	0,21	99,8
70	212	48,35	9,67	79,0	23,15	4,63	94,0	5,50	1,10	98,7
100	150	59,10	11,82	67,1	50,00	10,00	84,0	22,80	4,56	94,1
140	106	42,75	8,55	58,6	62,70	12,54	71,4	49,25	9,85	84,3
200	75	43,60	8,72	49,9	55,65	11,13	60,3	57,75	11,55	72,7
270	53	24,70	4,94	44,9	45,15	9,03	51,3	54,80	10,96	61,8
325	45	13,00	2,60	42,3	17,15	3,43	47,8	17,70	3,54	58,2
400	38	16,70	3,34	39,0	17,80	3,56	44,3	21,75	4,35	53,9
-400		194,95	39,0	0,00	221,35	44,27	0,0	269,40	53,88	0,0
Peso Muestra (g)		194,95	500,0		221,4	500,0		269,4	500,0	
Tiempo de Mol. (min)		305,1	3,0			6,0			10,0	
P₈₀ (µm)			220,5			135,2			93,8	
% Malla -400			39,0			44,27			53,88	



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 250804
 Fecha de Recepción : 13-08-25
 Fecha de Reporte : 14-08-25
 Nº de Muestras : 1 de 3

Atte: Joel Renzo SULCA CERDA

ANALISIS DE GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA ESPECIAL (MT)

MUESTRA: 500 gramos

TIEMPO DE MOLIENDA	10
Minutos	
1	
MT - 1	

MALLA	Abertura (mm)	Abertura (µm)	Peso, g	% Peso
6	3.350	3350	0.00	0.00
10	2.000	2000	0.00	0.00
20	0.850	850	0.00	0.00
30	0.600	600	0.00	0.00
50	0.300	300	1.05	0.21
70	0.212	212	5.50	1.10
100	0.150	150	22.80	4.56
140	0.106	106	49.25	9.85
200	0.075	75	57.75	11.55
270	0.053	53	54.80	10.96
325	0.045	45	17.70	3.54
400	0.038	38	21.75	4.35
-400			269.40	53.88
Calculado			500.00	100.00

NOTA: El análisis granulométrico de mallas se realizó con el tamizador con tiempo de 25 min.

[Handwritten Signature]
 Jefatura de Laboratorio Químico



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L.

N° de Orden : MT - 250804
 Fecha de Recepción : 13-08-25
 Fecha de Reporte : 14-08-25
 N° de Muestras : 2 de 3

Atte: Joel Renzo SULCA CERDA

ANALISIS DE GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA ESPECIAL (MT)

MUESTRA: 500 gramos

TIEMPO DE MOLIENDA	6
Minutos	2
	MT - 2

MALLA	Abertura (mm)	Abertura (µm)	Peso, g	% Peso
6	3.350	3350	0.00	0.00
10	2.000	2000	0.00	0.00
20	0.850	850	0.30	0.06
30	0.600	600	0.45	0.09
50	0.300	300	6.30	1.26
70	0.212	212	23.15	4.63
100	0.150	150	50.00	10.00
140	0.106	106	62.70	12.54
200	0.075	75	55.65	11.13
270	0.053	53	45.15	9.03
325	0.045	45	17.15	3.43
400	0.038	38	17.80	3.56
-400			221.35	44.27
Calculado			500.00	100.00

NOTA: El análisis granulométrico de mallas se realizó con el tamizador con tiempo de 25 min.


 Jefatura de Laboratorio Químico




REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 250804 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 13-08-25
 Fecha de Reporte : 14-08-25
 Nº de Muestras : 3 de 3

ANALISIS DE GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA ESPECIAL (MT)

MUESTRA: 500 gramos

TIEMPO DE MOLIENDA	3
Minutos	3
	MT - 3

MALLA	Abertura (mm)	Abertura (µm)	Peso, g	% Peso
6	3.350	3350	0.00	0.00
10	2.000	2000	0.20	0.04
20	0.850	850	4.80	0.96
30	0.600	600	6.85	1.37
50	0.300	300	45.00	9.00
70	0.212	212	48.35	9.67
100	0.150	150	59.10	11.82
140	0.106	106	42.75	8.55
200	0.075	75	43.60	8.72
270	0.053	53	24.70	4.94
325	0.045	45	13.00	2.60
400	0.038	38	16.70	3.34
-400			194.95	38.99
Calculado			500.00	100.00

NOTA: El análisis granulométrico de mallas se realizó con el tamizador con tiempo de 25 min.

[Handwritten Signature]
Jefatura de Laboratorio Químico

Anexo 6. Análisis de laboratorio químico de las Pruebas preliminares



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : PRE - MT - 01 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 18-08-25
 Fecha de Reporte : 19-08-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 01	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	6.37	13.47	17.16	0.46	6.58
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.28	39.96	15.98	0.39	1.23
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.18	4.51	32.82	0.09	0.45
5	RELAVE	0.06	0.57	28.28	0.02	0.10





REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L.

Nº de Orden : PRE - MT - 02 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 22-08-25
 Fecha de Reporte : 23-08-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ENSAYOS QUÍMICOS						
ITEM	CODIGO MT - 02	% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	13.29	13.40	17.18	0.68	15.43
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.31	50.12	12.39	0.48	1.38
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.40	42.94	14.80	0.49	1.37
5	RELAVE	0.09	0.89	30.20	0.03	0.19



[Handwritten Signature]
Jefatura de Laboratorio Químico



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : PRE - MT - 03 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 25-08-25
 Fecha de Reporte : 26-08-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ENSAYOS QUÍMICOS						
ITEM	CODIGO MT - 03	% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	15.53	13.39	14.46	0.79	17.21
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.34	49.28	13.16	0.50	1.43
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.33	27.54	28.28	0.29	1.04
5	RELAVE	0.06	0.84	30.62	0.03	0.14



EXPERTOS EN LABORATORIO



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L.

Nº de Orden : PRE - MT - 04 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 31-08-25
 Fecha de Reporte : 01-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 04	ENSAYOS QUIMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	16.36	13.35	14.57	0.79	18.65
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.32	52.80	10.84	0.50	1.38
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.38	48.08	12.63	0.45	1.44
5	RELAVE	0.09	2.08	30.76	0.05	0.21





REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L.

Nº de Orden : PRE - MT - 05 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 03-09-25
 Fecha de Reporte : 04-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 05	ENSAYOS QUIMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	17.84	13.29	14.28	0.78	18.74
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.33	51.00	12.50	0.49	1.43
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.43	41.18	15.61	0.44	1.39
5	RELAVE	0.09	0.81	30.14	0.02	0.12



[Handwritten Signature]
Jefatura de Laboratorio Químico
 MINLAB S.R.L.



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L.

Nº de Orden : PRE - MT - 06 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 06-09-25
 Fecha de Reporte : 07-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 06	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	18.22	16.50	17.37	1.07	20.38
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.34	50.88	11.83	0.46	1.37
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.41	22.83	20.90	0.32	1.02
5	RELAVE	0.08	0.73	31.44	0.02	0.19



Jefatura de Laboratorio Químico

EXPERTOS EN LABORATORIO

Anexo 8. Análisis de laboratorio de las pruebas del diseño experimental



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 01 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 10-09-25
 Fecha de Reporte : 11-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 01	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	17.75	13.66	11.53	0.82	21.10
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.37	45.30	11.56	0.47	1.42
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.42	31.62	14.65	0.44	1.47
5	RELAVE	0.10	0.96	29.92	0.02	0.14





REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 02 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 12-09-25
 Fecha de Reporte : 13-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ENSAYOS QUIMICOS						
ITEM	CODIGO MT - 02	% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	14.10	14.12	14.57	0.72	15.70
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.32	46.20	10.80	0.48	1.39
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.36	41.84	12.66	0.43	1.33
5	RELAVE	0.09	1.21	32.42	0.03	0.16





REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 03 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 18-09-25
 Fecha de Reporte : 19-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 03	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	16.22	14.60	15.14	0.75	17.12
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.31	46.88	11.49	0.47	1.33
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.36	43.10	14.34	0.43	1.32
5	RELAVE	0.11	1.48	30.30	0.04	0.17





REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L.

Nº de Orden : MT - 04 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 22-09-25
 Fecha de Reporte : 23-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 04	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	13.88	13.41	15.87	0.64	16.30
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.31	48.56	12.48	0.47	1.44
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.37	44.24	14.96	0.44	1.37
5	RELAVE	0.08	1.12	30.28	0.03	0.16



EXPERTOS EN LABORATORIO



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L.

Nº de Orden : MT - 05 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 28-09-25
 Fecha de Reporte : 29-09-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 05	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	19.37	14.11	16.07	0.88	20.06
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.31	48.84	12.79	0.48	1.38
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.40	44.94	14.20	0.49	1.48
5	RELAVE	0.09	1.29	29.08	0.03	0.18





REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 06 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 03-10-25
 Fecha de Reporte : 04-10-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ITEM	CODIGO MT - 06	ENSAYOS QUÍMICOS				
		% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	21.78	14.71	13.76	0.84	24.02
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.31	48.80	11.49	0.47	1.41
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.37	46.00	13.61	0.46	1.45
5	RELAVE	0.08	1.40	30.56	0.03	0.18



EXPERTOS EN LABORATORIO



REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 07 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 05-10-25
 Fecha de Reporte : 06-10-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ENSAYOS QUÍMICOS						
ITEM	CODIGO MT - 07	% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	17.56	14.40	15.81	0.64	17.59
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.32	48.96	13.77	0.44	1.45
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.40	38.88	19.54	0.34	1.35
5	RELAVE	0.09	0.78	29.12	0.03	0.15





REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO MINLAB S.R.L

Nº de Orden : MT - 08 Atte: Joel Renzo SULCA CERDA
 Fecha de Recepción : 10-10-25
 Fecha de Reporte : 11-10-25
 Nº de Muestras : 4

ANALISIS DE LEY DE MUESTRAS DE CONCENTRADO DE PLOMO, ZINC Y RELAVE

ENSAYOS QUÍMICOS						
ITEM	CODIGO MT - 08	% Pb	% Zn	% Fe	% Cu	Ag (gr/tm)
1	CABEZA	0.46	11.11	25.74	0.13	0.84
2	CONC. PLOMO	17.72	14.37	15.19	0.76	17.20
3	CONC. ROUGHER (Zinc)	0.33	49.88	11.44	0.49	1.47
4	CONC. SCAVENGER (Zinc)	0.40	42.02	16.64	0.41	1.37
5	RELAVE	0.09	0.99	30.92	0.03	0.15



Anexo 11. Registro fotográfico

Recolección de muestra en la cancha de mineral de la planta concentradora San Jerónimo.

- Muestreo



Preparación de muestra en el laboratorio químico MINLAB S.R.L. para luego ser llevado a realizar las pruebas de flotación en el laboratorio metalúrgico de la planta concentradora.



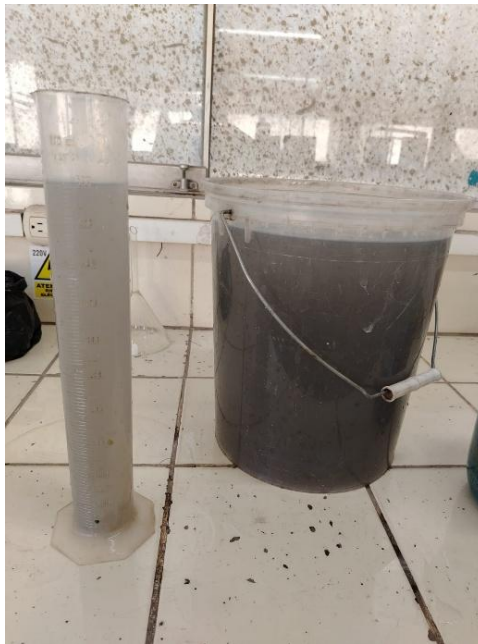




Preparación de reactivos a escala de laboratorio con datos reales del consumo de planta concentradora.



Se utiliza agua recirculada del proceso de la planta para realizar la molienda y las pruebas de flotación.



Equipos del laboratorio metalúrgico de la planta concentradora San Jerónimo

- *Molino de bolas*



- *Máquina de flotación, Celda y paleta*



MAQUINA DE FLOTACION DE LABORATORIO



CELDA DE FLOTACION DE 1kg



PALETA DE
FLOTACION



Procedimientos de las pruebas realizadas en el laboratorio metalúrgico

- *Molienda*





- flotación





- *Pulpa de concentrado obtenido*





ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc en la planta concentradora San Jerónimo- Ayacucho

Expositor: Joel Renzo Sulca Cerda

Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2630741 Resolución Decanal N° 025-2026-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 20-03-2026

En la Sala de Conferencia "Pedro Villena Hidalgo" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las ocho de la mañana con cinco minutos del día martes veinticuatro de marzo del año dos mil veintiséis, se reunieron el Bachiller en Ingeniería Química **Joel Renzo Sulca Cerda**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Mg. Abdías ASCARZA MOISES, Mg. Anibal Pablo GARCIA BENDEZU (Miembros) y Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA (Miembro-Asesor), bajo la Presidencia del Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA (Decano de la FIQM), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente).

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc en la planta concentradora San Jerónimo- Ayacucho**, presentado por el Bachiller **Joel Renzo Sulca Cerda**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 025-2026-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó al Bachiller **Joel Renzo Sulca Cerda**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de treinta y cinco minutos.

Finalizado la exposición del Bachiller, el presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA (Miembro-Asesor), Mg. Anibal Pablo GARCIA BENDEZU y Mg. Abdías ASCARZA MOISES (Miembros).

A continuación, el presidente del jurado invito al sustentante y al público para que se sirva abandonar la sala de conferencia con la finalidad de permitir al jurado de sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADO POR UNANIMIDAD PROMEDIO QUINCE (15)**.



UNSCH

FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y
METALURGIA

ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc en la planta concentradora San Jerónimo- Ayacucho

Expositor: Joel Renzo Sulca Cerda

Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2630741

Resolución Decanal N° 025-2026-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 20-03-2026

Finalmente, el Presidente del Jurado dispuso que se invite al Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la sala de conferencias y anunció que, el Bachiller **Joel Renzo Sulca Cerda**, ha resultado **APROBADO POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con un flamante **INGENIERO QUIMICO** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo las diez de la mañana con cinco minutos se dio por finalizado este acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:


.....
Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA
Presidente


.....
Mg. Abdías ASCARZA MOISES
Miembro


.....
Mg. Anibal Pablo GARCIA BENDEZU
Miembro


.....
Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA
(Miembro-Asesor)


.....
Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE
(Secretario Docente)

**UNSCH**FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIAESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 003-2026-UNSCH-FIQM/EPIQ**

El que suscribe, Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Que, habiendo recibido la solicitud de Constancia de Originalidad por parte del Bachiller **Joel Renzo SULCA CERDA**, se procedió a la evaluación de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU.

Como resultados del análisis, se obtuvo el siguiente reporte:

Tesis:**Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc en la planta concentradora San Jerónimo-Ayacucho**

Autor Bach. : Joel Renzo SULCA CERDA
Identificador : 2964892449
Fecha : 19 de mayo de 2026

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del **5% (cinco por ciento) de ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

Ayacucho, 19 de mayo de 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN
CRISTÓBAL DE HUAMANGA E.P.
INGENIERÍA QUÍMICA

Dr. Andrés JARA
Director de Escuela

Adjunto Recibo digital turnitin.
cc. archivo

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA
Av. Independencia S/N - Ayacucho
Telf. 066-312510 Anexo. 152
Correo:
ep.quimica@unsch.edu.pe

Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc en la planta concentradora San Jerónimo - Ayacucho

por Joel Renzo SULCA CERDA

Fecha de entrega: 19-may-2026 07:06a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2964892449

Nombre del archivo: o_de_zinc_en_la_planta_concentradora_San_Jer_nimo_-_Ayacucho.pdf (59.46M)

Total de palabras: 15126

Total de caracteres: 77548

Condiciones óptimas para la flotación del mineral complejo de zinc en la planta concentradora San Jerónimo - Ayacucho

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

3%

2

Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

1%

3

repositorio.unsa.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

4

www.scielo.org.pe

Fuente de Internet

<1%

5

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo