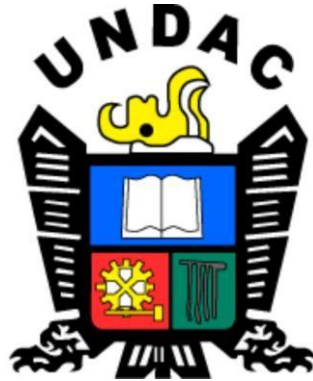


**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**T E S I S**

**Evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos del nivel 180, para la  
recuperación de cobre, plomo y zinc en la Empresa Minera Pan American Silver-  
Pasco, 2023**

**Para optar el título profesional de:  
Ingeniero Metalurgista**

**Autores:**

**Bach. Pamela Yajhaira COSME VILLEGAS**

**Bach. Ayrton Shaolin LOPE BENITO**

**Asesor:**

**Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO**

**Cerro de Pasco – Perú – 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**T E S I S**

**Evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos del nivel 180, para la  
recuperación de cobre, plomo y zinc en la Empresa Minera Pan American Silver-  
Pasco, 2023**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Dr. Eusebio ROQUE HUAMAN**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. Edgar Yoni AIRE MENDOZA**  
**MIEMBRO**

---

**Mg. José Elí CASTILLO MONTALVAN**  
**MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Unidad de Investigación**

**INFORME DE ORIGINALIDAD N° 009-2026-UNDAC/UIFI**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:  
**“Evaluación Metalúrgica de Minerales Polimetálicos del nivel 180, Para la Recuperación de Cobre, Plomo y Zinc en la Empresa Minera Pan American Silver-Pasco,2023”**

Apellidos y nombres de los tesisistas

**Bach. Pamela Yajhaira COSME VILLEGAS**

**Bach. Ayrton Shaolin LOPE BENITO**

Apellidos y nombres del Asesor:

**Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO**

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería Metalúrgica**

Índice de Similitud

**12 %**

**APROBADO**

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 20 de abril del 2026



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DANIEL  
ALCIDES  
CARRION  
[AVANZADA]**

Firmado digitalmente por PALOMINO  
SIDRO Ruben Edgar FAU  
20154605046 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 20.04.2026 16:01:36 -05:00

## **DEDICATORIA**

A nuestros Padres:

Por ser pilares de nuestras vidas, por su amor infinito, su apoyo incondicional y por sembrar en nosotros la semilla del conocimiento. Gracias por cada sacrificio y por ser nuestra guía constante. Todo lo que somos, se los debemos a ustedes.

A nuestra Hija:

A nuestra adorada Aylani, la luz de nuestros ojos y nuestra mayor motivación. Que este logro te inspire a perseguir tus propias metas y a creer siempre en ti misma. Eres nuestro mundo.

A nuestros Hermanos:

Por ser nuestros primeros amigos y mi apoyo inquebrantable. Gracias por cada palabra de aliento y por estar siempre presentes.

A mis Maestros:

A todos nuestros docentes y directores de tesis, por compartir su sabiduría, por su exigencia y por inspirar en mí un sentido de rigor académico. Gracias por no solo enseñar, sino por formar personas.

## **AGRADECIMIENTO**

En la realización de este trabajo de investigación, deseamos expresar nuestra más sincera gratitud a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional han sido un pilar fundamental en cada etapa de este proceso. Sus alientos y comprensión nos han motivado a seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes.

Queremos también agradecer a los Ingenieros de la E. F. P. de Ingeniería Metalúrgica, quienes, con su dedicación y compromiso, han sido esenciales en mi formación profesional. Sus enseñanzas y orientación me han proporcionado las herramientas necesarias para enfrentar los retos académicos y me han inspirado a buscar la excelencia.

Agradecemos de manera especial a los ingenieros de la Unidad Minera Pan American Silver Huarón por brindarme la oportunidad de desarrollar esta investigación. Su apoyo y disposición para compartir sus conocimientos han enriquecido significativamente mi experiencia y comprensión del campo.

## RESUMEN

El trabajo de investigación intitulado “Evaluación Metalúrgica de Minerales Polimetálicos del nivel 180, Para la Recuperación de Cobre, Plomo y Zinc en la Empresa Minera Pan American Silver, Pasco 2023”.

Presentando con el fin de determinar la evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023. El estudio de investigación aplicada, tipo de investigación experimental y diseño de investigación cuasiexperimental, la población de estudio fue el mineral del nivel 180 de la empresa Pan American Silver Huarón, estimada en un aproximado de 10,000 toneladas métricas (TM) para fines de contexto operacional. Para obtener una muestra representativa de esta población, se utilizó la fórmula teórica de muestreo de Pierre Gy  $M = \frac{1,25}{0,018} \approx 69,44$  gramos, resultando en una muestra total constituida por 70 kilogramos de mineral. Los resultados de las pruebas de molienda indican que, a medida que aumenta el tiempo de molienda, el porcentaje de material pasa por la malla -200. Al inicio, solo el 25,44% pasaba por la malla con un tiempo de molienda de 10 minutos, pero a los 20 minutos alcanzó el 64,66%. El tiempo óptimo de molienda se estima en 13,18 minutos, alcanzando el tamaño deseado sin excesiva molienda. En las pruebas de flotación, se utilizaron los siguientes consumos de reactivos: 35 g/ton de cianuro de sodio (CNNa). 1600 g/ton de cal, 200 g/ton de sulfato de cobre, 40 g/ton de bicromato, 35 g/ton de xantato (35 mg/kg), 4,58 g/ton de espumante H-150 y 200 gr/ton de sulfato de zinc, favoreciendo una flotación eficiente y una buena separación de los minerales. En cuanto a la cinética de flotación, la recuperación de plomo alcanzó un 78,19%, cobre 72,28%, y plata 69,10% en los primeros cinco minutos. El zinc presentó una recuperación acelerada, alcanzando un 83,20% en el mismo periodo.

**Palabra clave:** Evaluación metalúrgica, Minerales polimetálicos, Recuperación

## ABSTRACT

The research paper entitled “Metallurgical Evaluation of Polymetallic Minerals from Level 180 for Copper, Lead, and Zinc Recovery at the Pan American Silver Mining Company, Pasco 2023”.

was presented its purpose was to determine the metallurgical evaluation of polymetallic minerals from Level 180 for the recovery of copper, lead, and zinc at the Pan American Silver mining company in Pasco in 2023. The applied research study employed an experimental design with a quasi-experimental approach. The study population consisted of ore from Level 180 at the Pan American Silver Huaron mine, estimated at approximately 10,000 metric tons (MT) for operational context. To obtain a representative sample of this population, Pierre's Sampling Theory was used  $M = \frac{1,25}{0,018} \approx 69,44$  grams, resulting in a total sample of 70 kilograms of ore. The grinding test results indicate that, as the grinding time increases, the percentage of material passing through the -200 mesh screen also increases. Initially, only 25,44% passed through the screen after a grinding time of 10 minutes, but after 20 minutes, this figure reached 64,66%. The optimal grinding time is estimated at 13,18 minutes, achieving the desired size without over-grinding. In the flotation tests, the following reagent consumption was used: 35 g/ton of sodium cyanide (NaCN). 1600 g/ton of lime, 200 g/ton of copper sulfate, 40 g/ton of dichromate, 35 g/ton of xanthate (35 mg/kg), 4,58 g/ton of H-150 frother, and 200 g/ton of zinc sulfate were added, promoting efficient flotation and good mineral separation. Regarding flotation kinetics, lead recovery reached 78,19%, copper 72,28%, and silver 69,10% in the first five minutes. Zinc recovery was accelerated, reaching 83,20% in the same period.

**Keywords** Metallurgical evaluation, Polymetallic ores, Recovery

## INTRODUCCIÓN

La minera Huarón, operada por Pan American Silver y ubicada en la sierra central de la región Pasco, su operación se fundamenta en el procesamiento de un yacimiento polimetálico complejo, que incluye especies mineralógicas importantes como la galena argentífera (fuente de plata y plomo) y la esfalerita (principal mineral de zinc), además de una ganga variada compuesta por silicatos como la rodonita y diversos sulfosales de plata, plomo y cobre. Desarrollándose:

**CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:** Identificación y determinación del problema, formulación del problema, formulación de objetivos, justificación de la investigación, limitaciones de la investigación.

**CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO:** Antecedentes de estudio, bases teóricas – científicas, definición de términos básicos, formulación de hipótesis, identificación de variables, definición operacional de variables e indicadores.

**CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN:** Tipo de investigación, métodos de investigación, diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos, técnicas de procesamiento y análisis de datos, tratamiento estadístico, selección validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación, orientación ética.

**CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:** Descripción del trabajo de campo, presentación, análisis e interpretación de resultados, prueba de hipótesis, discusión de resultados.

Las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

Los autores

## INDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

INDICE DE TABLAS

INDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

#### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema .....	1
1.2. Delimitación de la investigación .....	2
1.3. Formulación del problema.....	3
1.3.1. Problema general .....	3
1.3.2. Problemas específicos .....	3
1.4. Formulación de objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos .....	3
1.5. Justificación de la investigación.....	4
1.6. Limitaciones de la investigación .....	5

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio .....	6
------------------------------------	---

2.1.1.	Antecedentes internacionales .....	6
2.1.2.	Antecedentes nacionales .....	7
2.1.3.	Antecedentes locales .....	9
2.2.	Bases teóricas – científicas .....	10
2.2.1.	Características del mineral de yacimiento .....	10
2.2.2.	Grado de molienda de minerales.....	11
2.2.3.	Flotación de minerales .....	12
2.2.4.	Etapas de proceso de flotación.....	12
2.2.5.	Cinética de flotación .....	14
2.2.6.	Variables de flotación .....	14
2.2.7.	Colectores .....	15
2.2.8.	Espumantes .....	16
2.2.9.	Depresores.....	17
2.2.10.	Activadores .....	18
2.2.11.	Pruebas metalúrgicas de flotación .....	19
2.3.	Definición de términos básicos .....	20
2.4.	Formulación hipótesis .....	21
2.4.1.	Hipótesis general.....	21
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	21
2.5.	Identificación de variables.....	21
2.5.1.	Variable independiente .....	21
2.5.2.	Variable dependiente .....	22
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores .....	23

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación .....	24
3.2. Nivel de investigación .....	25
3.3. Métodos de investigación .....	25
3.4. Diseño de investigación.....	26
3.5. Población y muestra .....	27
3.6. Técnicas e instrumento de recolección de datos.....	29
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	31
3.8. Tratamiento estadístico.....	32
3.9. Orientación ética filosófica y epistémica .....	32

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo .....	33
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	34
4.2.1. Caracterización física y química del mineral.....	35
4.2.2. Determinación del tiempo óptimo de molienda.....	36
4.2.3. Pruebas de flotación a nivel batch de cobre y plomo.....	38
4.2.4. Pruebas de flotación a nivel batch (efecto de reactivos).....	41
4.2.5. Determinación de la cinética de flotación de recuperación .....	54
4.3. Prueba de hipótesis .....	58
4.3.1. Hipótesis de investigación .....	59
4.4. Discusión de resultados .....	62

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## INDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>
Tabla 1 Operacionalización de variables .....	23
Tabla 2. Cuadro de dureza del mineral .....	35
Tabla 3. Ley de cabeza del mineral de la muestra .....	36
Tabla 4. Tiempo óptimo de molienda .....	37
Tabla 5. Parámetros de flotación .....	39
Tabla 6. Condiciones para la prueba de flotación.....	40
Tabla 7. Matriz de diseño factorial codificado .....	41
Tabla 8. Dosificación y resultados en el circuito de cobre .....	42
Tabla 9. Balance metalúrgico de cobre.....	42
Tabla 10. Dosificación y resultados en el circuito de plomo.....	44
Tabla 11. Balance metalúrgico de plomo .....	44
Tabla 12 Dosificación y resultados en el circuito de zinc .....	45
Tabla 13 Balance metalúrgico de zinc .....	46
Tabla 14 Balance metalúrgico para recuperación de cobre .....	47
Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA) para recuperación de cobre.....	49
Tabla 16 Balance metalúrgico para la recuperación de plomo .....	50
Tabla 17 Análisis de varianza (ANOVA) para recuperación de plomo .....	52
Tabla 18 Cinética de flotación bulk del mineral.....	54
Tabla 19 Cinética de flotación zinc del mineral .....	56
Tabla 20. Datos estadísticos del plomo.....	60
Tabla 21. Prueba de una muestra de plomo .....	60
Tabla 22. Balance metalúrgico del mineral .....	64

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1 <i>Diagrama de bloques de las pruebas metalúrgicas</i> .....	27
Figura 2 <i>Vista panorámica de la planta concentradora de Francois-Pan American Silver</i> ...	34
Figura 3 <i>Curva de moliendabilidad del mineral</i> .....	37
Figura 4 <i>Gráfica de efectos principales</i> .....	48
Figura 5 <i>Diagrama de pareto de efectos estandarizados</i> .....	49
Figura 6 <i>Gráfica de efectos principales</i> .....	51
Figura 7 <i>Diagrama de pareto de efecto estandarizados</i> .....	53
Figura 8 <i>Cinética de flotación bulk</i> .....	55
Figura 9 <i>Cinética de flotación zinc</i> .....	57
Figura 10 <i>Campana de Gauss</i> .....	61

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

La Minera Huarón, una operación subterránea mecanizada a cargo de Pan American Silver en la sierra central de la región Pasco, enfrenta un desafío crítico en la calidad del mineral extraído que alimenta su planta concentradora. A pesar de explotar un yacimiento polimetálico con potencial comercial, rico en plomo, plata y zinc, la mina no está logrando consistentemente una calidad de mineral extraído que cumpla con los requisitos para un procesamiento eficiente y la posterior venta competitiva de concentrados de cobre, plomo y zinc con altos contenidos de plata en el mercado futuro.

Actualmente, para optimizar la explotación y extracción de los minerales en la zona mineralizada del yacimiento, es imprescindible una evaluación rigurosa de las leyes y contenidos de los minerales presentes. Esta evaluación es importante para asegurar la calidad necesaria para su procesamiento y una futura venta de concentrados rentable.

Se ha identificado la zona baja del nivel 180 como un área con minerales de potencial comercial, caracterizados por su significativo contenido de cobre, plomo y

zinc, acompañados de altos contenidos de plata. Sin embargo, en pruebas de flotación previas, la recuperación de cobre alcanzó solo un 75%, un valor que requiere ser evaluado y potencialmente mejorado para asegurar la viabilidad económica del proyecto.

Por esta razón, es indispensable realizar un estudio de pruebas metalúrgicas detallado, utilizando la técnica de flotación diferencial. El objetivo es determinar los parámetros óptimos de operación y caracterización, tales como el grado de molienda, la dosificación de reactivos y la cinética de flotación, con la finalidad de alcanzar recuperaciones de cobre, plomo y zinc superiores, así como una calidad de concentrados que maximice su valor en el mercado. Este estudio busca, en última instancia, superar el desempeño actual y asegurar el cumplimiento de los requisitos de calidad y recuperación para la explotación futura del yacimiento.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

### **Delimitación geográfica**

El estudio se llevó a cabo en los laboratorios de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, situada en el distrito de Yanacancha, provincia Pasco y región de Pasco. Adicionalmente, para una caracterización química precisa del mineral y los productos obtenidos, se realizaron los análisis químicos de respaldo en los laboratorios de SGS de la Unidad Minera Chinalco Perú, ubicada en distrito Morococha, provincia Yauli, región Junín.

### **Delimitación de la población**

Los minerales utilizados en el estudio están conformados por mineral del nivel 180, en la empresa Pan American Silver Huarón ubicado en el distrito de Huayllay provincia y departamento de Pasco.

## **Delimitación de tiempo**

El estudio se llevó a cabo un lapso de periodo de tiempo de 7 meses.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo influye la evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos del nivel 180 en la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cuál es el grado molienda de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver?
- b) ¿Cuál es el efecto de los reactivos en la flotación de minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver?
- c) ¿Cuál es la cinética de flotación de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver?

### **1.4. Formulación de objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Realizar la evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar el efecto del grado molienda de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver.

- b) Determinar el efecto de los reactivos en la flotación de minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver.
- c) Determinar la cinética de flotación de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver.

### **1.5. Justificación de la investigación**

El estudio se ha desarrollado de acuerdo con las siguientes justificaciones.

#### **Justificación teórica**

La investigación se realiza para mejorar los procesos de recuperación de cobre, plomo y zinc en los minerales polimetálicos del nivel 180 de la mina Pan American Silver, mejorando la eficiencia metalúrgica y reduciendo costos operativos. Su finalidad es determinar condiciones óptimas de molienda y flotación, maximizando la recuperación de metales valiosos y minimizando el impacto ambiental.

#### **Justificación practica**

La investigación se desarrolla en el laboratorio químico metalúrgico realizando flotación batch con un set de pruebas y corridas en cual permitirá obtener la información necesaria para determinar el efecto de la dosificación y las condiciones realizando corridas en los diseños experimentales para determinar el set de prueba presento una mejor recuperación de Cu, Pb y Zn.

#### **Justificación metodológica**

El enfoque es de investigación cuantitativa de tipo aplicada tecnológica, nivel explicativo y diseño de investigación explicativa. Se basa en la aplicación de técnicas experimentales y análisis metalúrgicos, como pruebas de molienda y flotación, para evaluar la recuperación de metales. Esta metodología permite determinar el impacto de

diferentes variables en el proceso de extracción, mejorando los procedimientos y proporcionando datos clave para mejorar la eficiencia y selectividad en la recuperación de cobre, plomo y zinc.

## **1.6. Limitaciones de la investigación**

### **Limitación teórica**

Información verídica y aportante teórica de esta investigación radica en la complejidad de los procesos metalúrgicos de los minerales polimetálicos, que presentan interacciones complejas entre los metales y los reactivos. Además, la variabilidad mineralógica y la heterogeneidad del mineral del nivel 180 pueden afectar la predictibilidad y generalización de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, dificultando su aplicación directa en otros contextos.

### **Limitación temporal**

El factor del tiempo se presenta como una limitación importante en la toma de muestra de la labor de la zona baja del nivel 180. Esto se debe a diversos aspectos, como la disponibilidad de recursos, la duración del proyecto, el acceso a datos y la viabilidad práctica de llevar a cabo los resultados del laboratorio químico para el análisis del concentrado y determinar las recuperaciones. Es necesario considerar todos estos elementos para garantizar una ejecución eficiente y exitosa del proyecto.

### **Limitación de recursos**

El manejo del recurso económico fue todo un desafío, en esta investigación se refiere a la disponibilidad de equipos especializados para las pruebas metalúrgicas y reactivos necesarios en los ensayos de flotación. Además, la cantidad limitada de muestras representativas de los minerales polimetálicos del nivel 180 podría restringir la precisión y la escalabilidad de los resultados obtenidos, afectando la generalización del estudio.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Wang Gang et. Al (2022) realizó la publicación en un artículo científico el estudio sobre la tecnología de procesamiento de minerales de sulfuros polimetálicos complejos de plomo, cobre y zinc de Mongolia Interior. El problema que tienen es buscar la tecnología adecuada para la recuperación de los minerales polimetálicos complejos de plomo, cobre y zinc de Mongolia interior. Los estudios revelan que los elementos valiosos presentes en el mineral son Cu, Pb, Zn y Ag. Los minerales de cobre, plomo y zinc se encuentran meta somatizados y entrelazados entre sí, destacando que la galena y la calcopirita están envueltas, con la galena mostrando un tamaño de partícula no uniforme. La galena y la esfalerita tienen una relación continua, con superficies de contacto lisas y rectas, facilitando su separación. El mineral de plata está asociado a estos minerales metálicos, por lo que se utiliza un proceso de flotación mixta de cobre y plomo, seguido de su separación, y la flotación del zinc a partir de los relaves. Como resultado llega a las siguientes conclusiones:

- Se obtuvieron tres concentrados: en el de cobre, las leyes promedio de Cu y Ag fueron 18,41% y 594,82 g/t, con recuperaciones del 86,53% y 25,30%, respectivamente.
- El concentrado de plomo, las leyes promedio de Pb y Ag fueron 62,70% y 428,05 g/t, con recuperaciones del 85,01% y 54,62%.
- El concentrado de zinc, las leyes promedio de Zn y Ag fueron 28,12% y 165,75 g/t, con recuperaciones del 59,99% y 4,80%. La recuperación total de la plata fue del 84,72%, logrando la recuperación integral de los elementos valiosos del mineral.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Ávila (2019), realizó la tesis: “Evaluación de flotación a nivel de planta con colectores secundarios para mejorar la recuperación de plata en la Unidad Minera Recuperada – Huachocolpa – Huancavelica – 2019” para optar el título de Ingeniero Metalurgista en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión - Pasco. La investigación indicó que la recuperación de plata satisfizo en gran medida el valor del concentrado de plomo. El objetivo principal fue lograr mayores recuperaciones, para lo cual se utilizaron herramientas de recolección, análisis e interpretación de datos. Se realizaron balances metalúrgicos enfocados en la recuperación de plata y plomo, ya que ambos minerales están relacionados mineralógicamente. Ambos elementos constituyen un solo producto en el mercado, por lo que fue necesario estudiar tanto el comportamiento de la plata como del plomo.

El análisis de gráficas y tablas estadísticas permitió predecir lo que ocurriría en el proceso al evaluar los colectores AEROFLOAT 242, AEROPHINE 3418 y ambos añadidos al proceso. Los resultados obtenidos permitirán verificar si existen diferencias significativas en la recuperación al utilizar dosificaciones mínimas o máximas, y si es más efectivo el uso individual o combinado de los colectores en el proceso. Como

resultado, se obtuvieron recuperaciones mayores de plata y plomo, alcanzando un 87% y un 90,87% respectivamente. La dosificación de AEROFLOAT 242 fue de 13,5 g/t, lo cual permitió alcanzar una recuperación de plata del 88,9%.

La evaluación de la flotación con colectores secundarios (AEROFLOAT 242 y AEROPHINE 3418) demostró una mejora significativa en la recuperación de los metales valiosos. Como resultado llega a las siguientes conclusiones:

Recuperación máxima de plomo (Pb): Se alcanzó un 90,87%.

Recuperación máxima de plata (Ag): Se logró un 87% de recuperación.

Colector específico de plata: La dosificación de AEROFLOAT 242 en 13,5 g/t resultó en una recuperación de plata del 88,9%, verificando la efectividad del uso de colectores secundarios para optimizar el proceso de flotación y la rentabilidad del concentrado de plomo-plata.

Baldeon (2022) realizó la tesis: “Estudio de minerales polimetálicos por flotación para la concentración y valoración del mineral” para optar el título de Ingeniero Metalúrgico en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión-Huacho”. El objetivo del estudio fue evaluar el proceso de flotación utilizado en el laboratorio de la planta concentradora Santa Rosa de Jangas por parte de Roval Concentrados SAC. Este trabajo experimental consistió en realizar pruebas de molienda y flotación utilizando Z-11(g/t), MIBC(g/t) y A-404(g/t) en un mineral polimetálico con una ley de cabeza de 6,00% de plomo, 8,09% de zinc y 3,01 onzas por tonelada de plata.

Se llevaron a cabo 5 pruebas con diferentes porcentajes pasantes a la malla 200, utilizando diferentes dosificaciones de colectores y espumantes. Para la valoración del mineral, se utilizó un precio de 24,6 por onza de plata, 1836,50 por tonelada de plomo y 2450,40 por tonelada de zinc, basado en un total de 120 toneladas métricas.

El mejor resultado se obtuvo con un porcentaje pasante del 55% a la malla 200, utilizando 15,47 g/t de Z-11, 65,98 g/t de MIBC y 34,88 g/t de A-404. Esto resultó en un contenido de 26,92 onzas por tonelada de plata, 54,89% de plomo y 55,62% de zinc, con una recuperación del 80,05% de plata, 81,99% de plomo y 82,00% de zinc.

La valoración del concentrado de plomo fue de 2194,02 por tonelada, 716,38 por tonelada para el zinc y 260,21 por tonelada para el mineral. Como conclusión, se determinó que la molienda (%200m), MIBC(g/t) y A-404(g/t) influyen estadísticamente en la calidad de la plata y el plomo en el concentrado de plomo, y en la calidad del zinc en el concentrado de zinc. Además, la valorización del concentrado de plomo y zinc influye en la valorización del mineral, ya que el valor de p calculado es menor a 0,0.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

Meza. (2019), realizó la tesis: “ **Evaluación metalúrgica en el circuito de flotación para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la planta concentradora Iscaycruz – Oyon, Lima**”. para optar el título de Ingeniero Metalurgista en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión-Pasco. El estudio lo realiza en la compañía minera de Iscaycruz, en la que realiza la extracción de minerales de las minas Limpe, Chupa, Tinyag 1 y Tinyan 2. El mineral tiene una ley de cabeza de 10,68% de Zn, 0,73% de Pb y 0,56% de Cu, 0,61 Onz de Ag y 23,47% de Fe. La molienda lo realiza a 62% malla -200, y en la flotación bulk utiliza NaCN 15g/T, NaHSO<sub>3</sub> 400 g/T y ZnSO<sub>4</sub> 600 g/t, MIBC y Z-11 30 g/T, teniendo recuperaciones de plomo en 76,77%, cobre 69,60% y en la flotación de zinc se dosifico CuSO<sub>4</sub> 400 g/T, pH 10,8, Z-11 80 g/T y MIBC 36 g/T logrando una recuperación de 90,34%. Las conclusiones a la que llega son:

- La flotación bulk no presenta activación de sulfuros de zinc y puede controlarse fácilmente. En la prueba 2, el zinc se activa en 4,58% en el concentrado de plomo.
- La dosificación del metabisulfito en exceso en la limpieza no favorece, debido a que parte del plomo está deprimido.
- La activación de Zn en el concentrado de cobre es 10,30%, en el concentrado bulk es 19,16%, aparentemente el mineral de zinc de ce cobre 2 estaría influyendo.

## 2.2. Bases teóricas – científicas

### 2.2.1. Características del mineral de yacimiento

Lopez (2005) Los yacimientos de minas de tipo hidrotermal son conocidos por contener una variedad de minerales valiosos. Algunos de los minerales comunes encontrados en este tipo de yacimientos son:

- a. **Oro:** Los yacimientos hidrotermales pueden ser ricos en oro, con la formación de vetas de cuarzo auríferas asociadas con una solución hidrotermal que contiene oro disuelto.
- b. **Plata:** La plata también se encuentra en yacimientos hidrotermales en forma de vetas de cuarzo argentíferas o asociada con minerales de sulfuro de plomo y zinc.
- c. **Cobre:** Los yacimientos hidrotermales pueden ser ricos en cobre en forma de minerales de sulfuro como la calcopirita, bornita y calcocita.
- d. **Zinc:** Los yacimientos hidrotermales también pueden contener minerales de sulfuro de zinc como la esfalerita.
- e. **Plomo:** El plomo se encuentra en forma de minerales de sulfuro como la galena en yacimientos hidrotermales.
- f. **Hierro:** Algunos yacimientos hidrotermales pueden contener minerales de hierro como la pirita y la pirrotita.

**g. Estaño:** El estaño puede estar presente en forma de minerales de sulfuro o de óxido en yacimientos hidrotermales.

Estos son solo algunos ejemplos de los minerales que se pueden encontrar en los yacimientos de minas de tipo hidrotermal. La composición mineralógica puede variar ampliamente dependiendo de las condiciones geológicas y los procesos de formación específicos de cada yacimiento.

### **2.2.2. Grado de molienda de minerales**

Lopez (2005) La molienda de minerales es una etapa del proceso de conminución en la que se realiza una reducción de tamaño hasta la liberación del mineral valioso. El grado de molienda se refiere a la finura del producto molido y se puede expresar en términos de malla de molienda o diámetro de partícula. La molienda óptima es aquella que permite la máxima recuperación de la mena cuando se concentran los minerales. Los parámetros que influyen en el grado de molienda incluyen el tamaño de alimentación, el tamaño del producto, la densidad de pulpa, la velocidad crítica y el volumen de carga del molino. Existen diferentes tipos de molinos utilizados en la molienda de minerales, como molinos de barras, molinos de bolas y molinos autógenos. La elección del tipo de molino depende del tamaño de alimentación, el tamaño del producto, la dureza del mineral y la capacidad de molienda requerida.

Universidad Politecnica de Cartagena (2006) En la molienda en húmedo, se utiliza una suspensión de agua y mineral, mientras que en la molienda en seco se utiliza el mineral seco. La molienda en húmedo es más común que la molienda en seco, excepto en casos donde la humedad puede afectar al producto o donde no hay suficiente agua disponible. La molienda se lleva a cabo en etapas, con molienda primaria, secundaria y remolienda. La molienda primaria se realiza en molinos de barras, bolas, autógenos o semi-autógenos, y se utiliza para reducir el tamaño de partícula a un tamaño

que permita la liberación del mineral valioso. La molienda secundaria se realiza en molinos de bolas y se utiliza para reducir aún más el tamaño de partícula. La remolienda se realiza en molinos de bolas o molinos verticales y se utiliza para aumentar la liberación del mineral valioso en concentrados. La molienda es un proceso que requiere una alta energía y una alta inversión en equipos. Por lo tanto, es importante optimizar el proceso de molienda para maximizar la eficiencia y reducir los costos. La optimización del proceso de molienda puede lograrse mediante el control adecuado de los parámetros de molienda y el uso de equipos eficientes.

### **2.2.3. Flotación de minerales**

Azañero (2015) La flotación de minerales polimetálicos es un proceso de separación de minerales valiosos de diferentes metales presentes en una mena. Esta técnica se utiliza comúnmente en la industria minera para aumentar la concentración de metales y así obtener un producto de mayor valor económico

En la flotación de minerales polimetálicos, se utiliza un agente químico conocido como reactivo de flotación para modificar las propiedades superficiales de los minerales. Este reactivo se añade al agua junto con los minerales molidos y se crea una espuma que contiene los minerales valiosos. Esta espuma es recolectada y separada del agua, permitiendo así la recuperación de los minerales.

### **2.2.4. Etapas de proceso de flotación**

Gonzales (2018) La flotación de minerales polimetálicos implica varias etapas que se detallan a continuación:

- **Chancado y molienda:** El mineral se reduce de tamaño a través de la trituración y la molienda, con el fin de liberar las partículas minerales valiosas de la ganga.
- **Acondicionamiento:** En esta etapa, se añaden reactivos químicos al mineral molido para modificar su superficie y mejorar la selectividad de la flotación. Estos

reactivos pueden incluir colectores, espumantes, modificadores de pH y otros reactivos específicos para cada tipo de mineral.

- **Flotación rougher:** En esta etapa, se realiza una flotación inicial para separar los minerales valiosos de la ganga. Se utilizan espumantes y colectores para generar burbujas de aire que se adhieren a los minerales valiosos y los llevan a la superficie, formando una espuma concentrada.
- **Flotación scavenger:** Si es necesario, se realiza una segunda etapa de flotación para recuperar los minerales valiosos que no se separaron en la etapa Rougher. Esta etapa se conoce como flotación scavenger y puede repetirse varias veces dependiendo de la composición del mineral.
- **Flotación cleaner:** En esta etapa, se lleva a cabo una limpieza adicional de la espuma para obtener un concentrado de alta calidad. Se utilizan espumantes y colectores más selectivos para separar los minerales principales de los minerales secundarios.
- **Flotación de desbaste:** Si es necesario, se puede realizar una última etapa de flotación de desbaste para recuperar los minerales valiosos residuales que no se separaron en las etapas anteriores.
- **Filtración y secado:** Una vez obtenido el concentrado de minerales valiosos, se realiza la filtración y el secado para eliminar el exceso de agua y obtener un producto final listo para su transporte y procesamiento adicional.

Estas etapas pueden variar dependiendo de la composición del mineral y de los requerimientos específicos de la planta de procesamiento. Además, es importante tener en cuenta que la flotación de minerales polimetálicos puede requerir la adición de reactivos adicionales y la modificación de los parámetros de operación en cada etapa para lograr una buena recuperación y selectividad de los minerales.

### 2.2.5. Cinética de flotación

Gonzales (2018) La cinética de flotación es el estudio de la velocidad de adhesión de partículas minerales a burbujas de aire durante el proceso de flotación. La velocidad de flotación está influenciada por varios factores, incluyendo la hidrofobicidad de las partículas, el tamaño de las partículas, la concentración de sólidos en la pulpa, el pH, la temperatura y la presencia de reactivos de flotación.

La flotación es un proceso complejo que implica la interacción de varios factores, incluyendo las propiedades físicas y químicas de las partículas, las propiedades del medio líquido y las propiedades de las burbujas de aire. La hidrofobicidad de las partículas minerales es un factor en la flotación, ya que permite la adhesión de las partículas a las burbujas de aire.

La velocidad de flotación se puede describir mediante ecuaciones cinéticas, como la ecuación de Langmuir y la ecuación de Freundlich. La ecuación de Langmuir describe la adsorción de colectores en la superficie de las partículas minerales, mientras que la ecuación de Freundlich describe la adsorción de espumantes en la superficie de las burbujas de aire.

### 2.2.6. Variables de flotación

Wills (2006) Algunas variables significativas en la flotación de minerales polimetálicos incluyen:

- a) **Composición mineralógica:** La presencia y proporción de minerales en el mineral polimetálico influirán en los reactivos y condiciones de flotación adecuados. Cada mineral puede requerir diferentes reactivos químicos y condiciones de pH para ser flotado de manera efectiva.
- b) **Granulometría:** El tamaño de partícula del mineral influirá en la eficiencia de la flotación. Generalmente, se prefiere una granulometría fina para asegurar una

liberación adecuada de los minerales valiosos y facilitar la interacción con los reactivos.

- c) **pH:** El pH del medio acuoso en el proceso de flotación es crucial para controlar las propiedades químicas de los minerales y la efectividad de los reactivos. Debe optimizarse el pH para favorecer la flotación selectiva de los minerales deseados.
- d) **Reactivos químicos:** Los reactivos, como colectores, modificadores de pH y espumantes, son esenciales en la flotación de minerales polimetálicos. La elección y dosificación adecuadas de estos reactivos afectarán la selectividad y recuperación de los minerales valiosos.
- e) **Temperatura:** La temperatura del proceso de flotación también puede influir en la eficacia de la flotación. En algunos casos, un aumento de la temperatura puede mejorar la flotabilidad de los minerales, mientras que, en otros casos, puede ser perjudicial.
- f) **Concentración de pulpa:** La cantidad de mineral en suspensión en el agua, conocida como concentración de pulpa, afectará la velocidad de flotación y la selectividad de los minerales. Una concentración adecuada puede favorecer la flotación selectiva de los minerales de interés.

### 2.2.7. Colectores

Azañero (2015) En la flotación de minerales polimetálicos, los colectores son sustancias químicas utilizadas para promover la adhesión de las partículas de mineral a las burbujas de gas y así facilitar su separación de la ganga. Su función principal es mejorar la selectividad de la flotación, es decir, permitir la recuperación selectiva de los minerales de interés mientras se minimiza la recuperación de los minerales.

Los colectores pueden ser de naturaleza aniónica, catiónica o no iónica, y su elección depende de la composición mineralógica y química de la mena. A

continuación, se presentan algunos ejemplos de colectores comúnmente utilizados en la flotación de minerales polimetálicos:

- a. **Xantatos:** Son colectores aniónicos ampliamente utilizados en la flotación de sulfuros metálicos, como los minerales de cobre y plomo. Mejoran la selectividad de la flotación al adsorberse en la superficie de los sulfuros metálicos y formar una capa hidrofóbica.
- b. **Ditiocarbamatos:** Son colectores aniónicos utilizados en la flotación de minerales de cobre, plomo y zinc. Su función principal es la activación de la superficie del sulfuro metálico para mejorar su adherencia a las burbujas de gas.
- c. **Aerofloat:** Es un colector catiónico utilizado en la flotación de minerales de plata. Funciona adsorbiéndose en la superficie de los sulfuros de plata y formando una capa hidrofóbica que promueve su flotabilidad.
- d. **Ácidos grasos:** Son colectores no iónicos utilizados en la flotación de minerales de estaño y tungsteno. Se adsorben en la superficie de los minerales y forman una capa hidrofóbica que facilita su adherencia a las burbujas de gas.

#### **2.2.8. Espumantes**

Azañero (2015) La función de los espumantes en la flotación de minerales polimetálicos es aumentar la estabilidad y la capacidad de formación de espuma de la suspensión de partículas en el agua. Los espumantes son sustancias químicas que se agregan al proceso de flotación para facilitar la adherencia de las partículas minerales a las burbujas de aire, lo que permite la separación de los minerales valiosos de las gangas.

La definición de los espumantes en la flotación de minerales polimetálicos se refiere a compuestos químicos que tienen la capacidad de reducir la tensión superficial del agua y estabilizar las burbujas de aire formadas durante el proceso de flotación. Los

espumantes pueden ser aceites, alcoholes, éteres, sulfatos, entre otros compuestos, que se mezclan con el agua y se dispersan en forma de pequeñas gotas o películas en la interfaz entre el aire y el agua.

Estos compuestos químicos actúan atrayendo las partículas minerales hacia las burbujas de aire, lo que facilita su transporte a la superficie de la suspensión y su posterior recolección en la espuma. Además, los espumantes también ayudan a reducir la dispersión de las partículas finas en el agua, mejorando así la selectividad de la flotación y aumentando la eficiencia del proceso de separación de minerales polimetálicos.

### **2.2.9. Depresores**

Astucuri (1994) En la flotación de minerales polimetálicos, los depresores son sustancias químicas utilizadas para inhibir la flotación de un determinado mineral o grupo de minerales, con el fin de mejorar la selectividad del proceso de flotación.

Estos depresores se agregan al circuito de flotación para evitar que ciertos minerales se adhieran a las burbujas de aire y floten junto con los minerales de interés. Los depresores actúan modificando la propiedad superficial de los minerales que se desea deprimir, impidiendo su adsorción del colector y minimizando su capacidad para interactuar con las burbujas de aire.

Existen diferentes tipos de depresores utilizados en la flotación de minerales polimetálicos, algunos de los cuales incluyen:

- a. **Depresores insolubles:** Estos depresores se utilizan para deprimir minerales insolubles en el agua, como minerales de óxido o minerales de arcilla. Al agregar estos depresores insolubles, se forma una capa en la superficie del mineral, evitando así su flotación.

- b. **Depresores orgánicos:** Los depresores orgánicos se utilizan para deprimir minerales metálicos específicos, como minerales de cobre o minerales de zinc. Estos depresores son moléculas orgánicas que se adhieren selectivamente a la superficie del mineral que se desea deprimir, inhibiendo su flotación.
- c. **Depresores de pH:** Al ajustar el pH de la pulpa de flotación, se pueden deprimir ciertos minerales. Por ejemplo, el uso de cal apagada puede deprimir minerales de pirita, mientras que el uso de ácido puede deprimir minerales de carbonato.
- d. En resumen, los depresores en la flotación de minerales polimetálicos son sustancias químicas utilizadas para inhibir la flotación de minerales específicos, mejorando así la selectividad del proceso de flotación. Estos depresores pueden ser insolubles, orgánicos o ajustadores de pH, dependiendo de los minerales que se deseen deprimir.

#### **2.2.10. Activadores**

Astucuri (1994) Los activadores en la flotación de minerales polimetálicos son compuestos químicos que se utilizan para mejorar la selectividad de la flotación, es decir, para promover la flotación de un mineral específico mientras se deprime la flotación de otros minerales presentes en la mena.

La función principal de los activadores es aumentar la afinidad entre las partículas del mineral que se quiere flotar y las burbujas de aire, lo que facilita la adhesión de estas partículas a las burbujas y su posterior separación de los demás minerales. El activador actúa en la superficie del mineral modificando sus propiedades físico-químicas y promoviendo la formación de una capa selectiva que favorece su flotabilidad.

Los activadores utilizados en la flotación de minerales polimetálicos pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica. Algunos ejemplos comunes de activadores son:

- a. **Cianuro de sodio:** Se utiliza como activador de minerales de plata, ya que forma complejos solubles con los iones plata.
- b. **Sulfato de cobre:** Actúa como activador de minerales de zinc, ya que forma complejos solubles con los iones zinc.
- c. **Sulfato de zinc:** Se utiliza como activador de minerales de cobre, ya que forma complejos solubles con los iones cobre.
- d. **Nitrito de sodio:** Se usa como activador de minerales de plomo, ya que forma complejos solubles con los iones plomo.

Estos son solo algunos ejemplos, ya que la selección del activador específico a utilizar depende de la composición de la mena y de los minerales objetivo de flotación. También es importante mencionar que la dosificación y la concentración del activador deben ser controladas cuidadosamente para lograr los mejores resultados de flotación.

#### **2.2.11. Pruebas metalúrgicas de flotación**

Gupta (2006) Las pruebas metalúrgicas de flotación son pruebas de laboratorio que se realizan para evaluar la viabilidad de la recuperación de minerales valiosos por flotación. Estas pruebas son esenciales para determinar los parámetros óptimos de operación de una planta de procesamiento de minerales.

En estas pruebas, se utiliza una muestra representativa del mineral a ser procesado y se somete a un proceso de molienda para obtener un tamaño de partícula adecuado. Luego, se agrega una serie de reactivos químicos al agua para formar una pulpa, y la muestra se somete a una serie de pruebas de flotación en una celda de flotación.

Durante las pruebas de flotación, se varían diferentes variables como la concentración de reactivos, el pH, la velocidad de agitación, el tiempo de flotación,

entre otros, para determinar sus efectos en la recuperación y la calidad del concentrado obtenido.

Después de realizar múltiples pruebas con diferentes combinaciones de variables, se debe determinar las condiciones óptimas de flotación que maximizan la recuperación de los minerales valiosos y minimizan la presencia de impurezas en el concentrado.

Las pruebas metalúrgicas de flotación no solo proporcionan información sobre la recuperación y la calidad del concentrado, sino que también se utilizan para estimar los balances de masa y la cinética de flotación del mineral. Estos datos son fundamentales para el diseño y la optimización de un circuito de flotación a escala industriales.

### 2.3. Definición de términos básicos

- **Balance metalúrgico:** El balance metalúrgico es un cálculo que determina la cantidad de material presente en un proceso metalúrgico, comparando la entrada y salida de cada componente. Su objetivo es identificar y corregir posibles pérdidas o ganancias durante la operación.
- **Nivel:** El nivel en una mina subterránea se refiere a una galería o conjunto de galerías horizontales situadas a la misma altura. Estos niveles permiten la ventilación, el acceso y el transporte de minerales dentro de la mina.
- **Flotación batch:** La flotación batch es un método de procesamiento de minerales en el que se realiza una sola operación de flotación en un tiempo determinado y con una alimentación de mineral constante.
- **Ensayos químicos:** Los ensayos químicos metalúrgicos son pruebas realizadas en laboratorio para determinar las propiedades y composición química de los

materiales metálicos. Estas pruebas incluyen análisis de elementos, determinación de propiedades físicas y químicas, y evaluación de la calidad

- **Concentración:** Proceso de enriquecimiento de mena mineral utilizando métodos mineralúrgicos consiste en remover el material que no posee un valor económico, conocido como ganga, con el objetivo de reducir el volumen del mineral. Este proceso puede basarse en las propiedades físicas (como densidad, magnetismo o electricidad) o físico-químicas de los minerales.

## **2.4. Formulación hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

La evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos del nivel 180 permitirá mejorar los parámetros de flotación, incrementando la recuperación de cobre, plomo y zinc, mejorando la eficiencia del proceso metalúrgico.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a) Si determinamos que un mayor grado de molienda de los minerales polimetálicos del nivel 180 incrementará la recuperación de cobre, plomo y zinc, mejorando la eficiencia del proceso de flotación.
- b) Si determinamos que la correcta selección de reactivos en la flotación de minerales incrementará la recuperación de cobre, plomo y zinc, mejorando la eficiencia del proceso.
- c) Si la cinética de flotación de los minerales polimetálicos del nivel 180 influirá en la velocidad de recuperación de cobre, plomo y zinc, optimizando su separación en las primeras etapas.

## **2.5. Identificación de variables**

### **2.5.1. Variable independiente**

Evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos del Nivel 180

### **2.5.2. Variable dependiente**

Recuperación de cobre, plomo y zinc

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

**Tabla 1** Operacionalización de variables

Variables	Definición	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente			
Evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos del nivel 180	Se refiere al proceso de evaluación de las características metalúrgicas de depósitos minerales que contienen múltiples metales valiosos, para determinar los métodos de extracción más eficientes y rentables.	Grado de molienda  Efectos de reactivos de flotación  Cinética de flotación	micras  Dosificación de colector Dosificación de espumantes Dosificación de reactivos modificadores Tiempo / recuperación
Variable dependiente			
Recuperación de cobre, plomo y zinc	Razón entre la masa del material útil obtenido en el concentrado y la masa de material útil contenido en la alimentación.	Recuperación metalúrgica: $R = \frac{Cc}{Ff} \times 100$	C= peso del concentrado c = ley del mineral en el concentrado F= peso de la alimentación f = ley de mineral en la alimentación

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

El estudio de investigación se enmarcó en el tipo de investigación experimental aplicada (o tecnológica). Este enfoque fue seleccionado por su capacidad para emplear el conocimiento científico y tecnológico existente, así como generar nuevo conocimiento, con el propósito de encontrar soluciones prácticas y directas a problemas tecnológicos específicos que afectaron la eficiencia y rentabilidad de la Minera Huarón.

Tal como lo señala Peñuelas (2010), la investigación aplicada tecnológica se orienta al desarrollo de nuevos conocimientos y su aplicación concreta en la creación o mejora de productos, procesos o servicios tecnológicos. En este sentido, nuestro estudio busca resolver el problema de la calidad inconsistente del mineral alimentado a la planta concentradora y su impacto en la recuperación y leyes de los concentrados de cobre, plomo, zinc y plata, a través de la implementación y validación de metodologías científicas y el uso de tecnología apropiada.

La elección de este tipo de investigación se justificó plenamente en el contexto de la Minera Huarón, debido a que los resultados obtenidos no solo buscaron

comprender la problemática, sino que fueron susceptibles de ser llevados directamente a la práctica. Esto implica la propuesta de estrategias operativas concretas en la mina (gestión de la variabilidad mineralógica en la extracción) y en la planta concentradora (ajuste de parámetros de flotación), las cuales tienen un potencial impacto directo en el mejoramiento de la eficiencia metalúrgica, la calidad de los concentrados, y consecuentemente, en la rentabilidad y sostenibilidad de la operación minera. El enfoque práctico y orientado a la solución de problemas concretos se alinea con las necesidades y demandas de la industria minera para optimizar sus procesos y asegurar su competitividad en el mercado.

### **3.2. Nivel de investigación**

Para abordar este nivel explicativo, los procedimientos empleados en la investigación incluirán una combinación de enfoques metodológicos:

**Método analítico:** Siguiendo a Arias (2012), este método es fundamental para la comprensión del problema. Implicará la descomposición del complejo proceso de concentración de minerales y la variabilidad del mineral de Huarón en sus partes constituyentes. Esto permitirá estudiar por separado aspectos como la mineralogía de los frentes de minado, el comportamiento de las sulfosales y silicatos, el impacto de las leyes de alimentación y las condiciones de flotación en las recuperaciones y leyes finales. La integración de estos análisis individuales facilitará una comprensión más completa de las interacciones y causas de la problemática.

### **3.3. Métodos de investigación**

**Método deductivo:** Se utilizará este método para inferir conclusiones específicas a partir de premisas generales o teorías consolidadas. Por ejemplo, a partir de principios generales de la flotación mineral y la química de superficies, se deducirán hipótesis específicas sobre el comportamiento de ciertos minerales o reactivos en el

circuito de Huarón. Si las teorías sobre la flotabilidad diferencial de la galena y la esfalerita son verdaderas bajo ciertas condiciones, se esperará un resultado particular al aplicar dichas condiciones en el estudio.

**Método inductivo:** Complementariamente, el método inductivo se aplicará a través de la observación de casos particulares y la experimentación. A partir de los resultados de pruebas a nivel de laboratorio o planta piloto (observaciones de casos específicos de procesamiento con diferentes tipos de mineral o condiciones), se buscarán patrones o regularidades que permitan establecer hipótesis y, eventualmente, llegar a conclusiones o generalizaciones más amplias sobre las causas de la variabilidad en la calidad de los concentrados.

**Métodos empíricos:** Estos métodos, que involucran análisis a través de la observación directa y la experimentación, serán cruciales para la recolección de datos primarios. Se realizarán observaciones en campo (operaciones mineras, muestreo de mineral) y experimentos controlados en laboratorio o planta (pruebas de flotación, análisis mineralógicos) para validar las hipótesis y obtener evidencia empírica que sustente las explicaciones sobre el impacto de la variabilidad del mineral en el proceso y la calidad de los concentrados.

La combinación de estos métodos permitirá no solo describir la variabilidad y sus efectos, sino, fundamentalmente, explicar por qué la calidad del mineral extraído afecta la eficiencia del procesamiento y la calidad final de los concentrados, y cómo se pueden establecer las relaciones de causa-efecto para proponer soluciones efectivas.

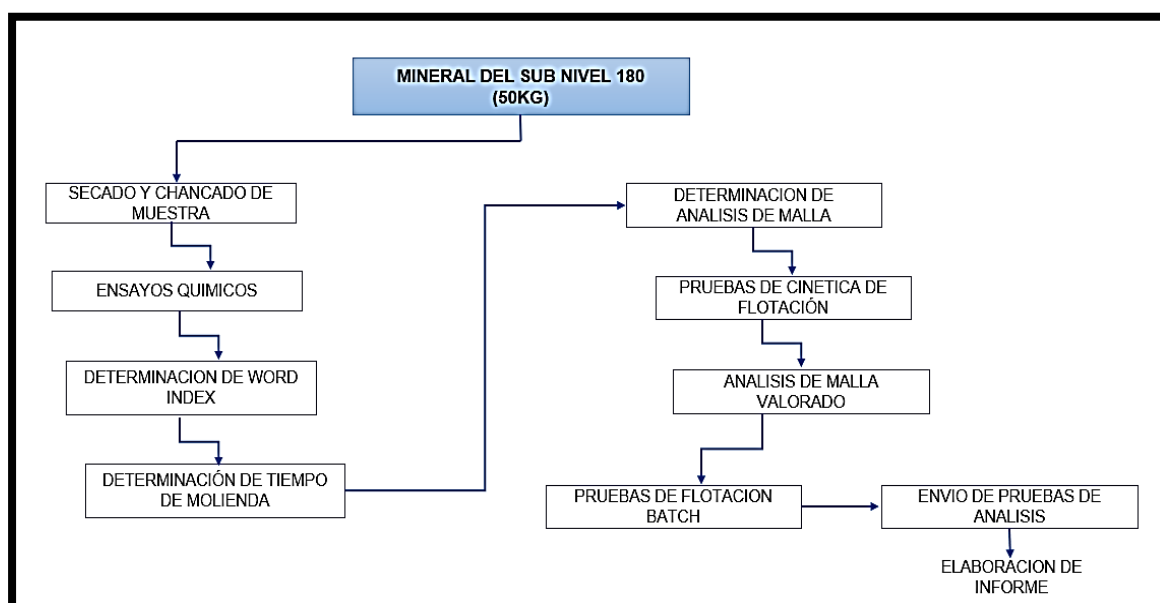
### **3.4. Diseño de investigación**

El estudio presenta un diseño de investigación experimental. Según (Hernandes et al ,1997), se refiere a un tipo de diseño que se utiliza para establecer una relación de causa y efecto entre variables. Se trata de una forma sistemática de investigar en la que

se manipulan una o más variables independientes para determinar su impacto en la variable dependiente.

Además, la investigación por pruebas metalúrgicas implica la aleatorización de los participantes o muestras en los grupos, para asegurar que cualquier diferencia encontrada entre los grupos se debe a la manipulación de la variable independiente y no a otros factores.

**Figura 1** Diagrama de bloques de las pruebas metalúrgicas



Nota: Diagrama de bloques del mineral de sub nivel 180.

### 3.5. Población y muestra

La población que está conformada por el mineral del nivel 180, de la empresa Pan American Silver Huarón

La muestra debe ser seleccionada de forma aleatoria, utilizando métodos estadísticos adecuados, para asegurar que sea representativa y generalizable a la población.

Muestra

Fórmula utilizada:

$$M = \frac{(d_m)^3 \cdot S^2}{(c \cdot f \cdot g)}$$

**Donde:**

M = Masa mínima de muestra (g)

$$d_m = 5 \text{ mm ( tamaño de particula)}$$

S = 0,1 (desviación estándar relativa, suponiendo un valor)

c = 0,2 (coeficiente de forma supuesto)

f = 0,02 (factor de mineralización supuesto)

g = 4,5 g / cm<sup>3</sup> ( densidad aparente del mineral supuesto)

**Sustitución de valores en la ecuación**

1. Calculamos  $(d_m)^3$

$$5^3 = 125$$

2. Calculamos  $S^2$ :

$$(0,1)^2 = 0,01$$

3. Multiplicamos estos valores:

$$125 \times 0,01 = 1,25$$

4. Calculando el denominador

$$c \cdot f \cdot g = 0,2 \times 0,02 \times 4,5$$

5. Resolviendo el denominador

$$0,2 \times 0,02 = 0,004$$

$$0,004 \times 4,5 = 0,018$$

6. Finalmente dividimos:

$$MM \frac{1,25}{0,018} = 69,44 \text{ gramos}$$

Muestra estará constituida por 70 kilogramos de población.

### 3.6. Técnicas e instrumento de recolección de datos

#### **Técnicas:**

**Observación:** Esta técnica será fundamental para el registro directo y sistemático de los procesos operativos en la mina subterránea (frentes de explotación, manejo y segregación de mineral) y en la planta concentradora (condiciones de alimentación, operación de los circuitos de flotación). La observación permitirá identificar visualmente las variabilidades en el mineral, las prácticas de minado y las interacciones dentro de la planta que podrían influir en la eficiencia metalúrgica. Se realizará de manera no participante para no interferir con las operaciones normales.

**Entrevista:** Se aplicarán entrevistas semiestructuradas al personal clave de Minera Huarón, incluyendo geólogos de mina, ingenieros de planeamiento, supervisores de minado, ingenieros y operadores de planta concentradora, y personal de laboratorio metalúrgico. El objetivo será recabar información sobre:

- Percepciones acerca de la calidad actual del mineral y sus desafíos.
- Procedimientos actuales de control geológico y segregación de mineral en mina.
- Problemas operativos específicos en la planta relacionados con la variabilidad de la alimentación.
- Experiencias previas con mineralogías complejas y soluciones implementadas.
- Sugerencias y conocimientos empíricos del personal con años de experiencia en la operación.

**Análisis documental:** Se revisará y analizará información existente y documentada de Minera Huarón, que incluirá:

- Reportes de producción de mina (tonelajes, leyes, frentes de extracción).
- Reportes metalúrgicos de planta (leyes de alimentación, concentrados y relaves; recuperaciones; consumos de reactivos).

- Mapas geológicos y planos de minado detallados.
- Análisis mineralógicos históricos del yacimiento y de las muestras de planta.
- Literatura científica y técnica relevante sobre la mineralogía y flotación de yacimientos polimetálicos con características similares.

### **Instrumentos**

Los instrumentos de recolección de datos en la evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos, considerando el tiempo de molienda, cinética de flotación y reactivos de flotación, pueden incluir:

- Cuaderno de apuntes / bitácora de campo y laboratorio: Para el registro sistemático y cronológico de observaciones, datos primarios de las pruebas (tiempos, dosificaciones, mediciones de pH, etc.), detalles del muestreo, impresiones de entrevistas y cualquier otra información relevante.
- Fichas de registro / formatos de datos: Diseñados específicamente para documentar los parámetros de las pruebas de molienda y flotación (ej., tiempo de molienda, RPM de celdas, dosificación de reactivos, pH inicial y final).
- Reportes de ensayos químicos: Documentos generados por el laboratorio químico que contendrán los resultados de las leyes de metales (cobre, plomo, zinc, plata) e impurezas en las muestras de alimentación, concentrados y relaves.
- Balances metalúrgicos: Hojas de cálculo o reportes estructurados que integran los datos de leyes y pesos para calcular las recuperaciones y distribuciones de metales en los diferentes productos del proceso de flotación.
- Guía de observación: Lista de chequeo o formato estructurado para registrar la información relevante durante la observación de procesos en mina y planta.
- Guía de entrevista: Cuestionario con preguntas abiertas y semiabiertas para dirigir las entrevistas con el personal clave.

- Cámara fotográfica/video: Para la documentación visual de los procesos, características del mineral y equipos.
- Cronómetros y temporizadores: Para medir con precisión el tiempo de molienda y controlar los procesos de forma adecuada.
- Equipos de molienda y tamizado: Para realizar la molienda de las muestras de minerales y obtener granulometrías específicas.
- Balanzas de precisión: Para medir con exactitud las cantidades de reactivos utilizados en los procesos de flotación.
- Equipos de flotación: Para llevar a cabo las pruebas de flotación y evaluar la cinética de flotación de los minerales.
- Equipos de análisis químico: Para determinar la composición química de las muestras y evaluar la eficacia de los reactivos de flotación.
- Equipos de registro de datos: Para registrar y analizar los resultados obtenidos durante los procesos de molienda y flotación.
- Estos instrumentos son fundamentales para recopilar datos precisos y detallados que permitan evaluar de manera efectiva el proceso metalúrgico de minerales polimetálicos, especialmente en lo que respecta al tiempo de molienda, la cinética de flotación y el uso de reactivos específicos en el proceso de flotación.

### **3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Aplicaremos nuestros conocimientos teóricos y prácticos para examinar y procesar la información recopilada de las pruebas metalúrgicas, analizando diversas situaciones, circunstancias y cantidades. Este análisis nos ayudará a identificar los elementos que influyen en la eficacia de la recuperación, al modificar la variable controlada y evaluar su impacto en la variable dependiente. Para agilizar estos procesos, haremos uso de hojas de cálculo y programas de estadística.

### **3.8. Tratamiento estadístico**

Para realizar los análisis estadísticos, se utilizarán modelos tabulares y gráficos para procesar los datos, junto con software como minitab 19 y Ms-excel 2020. Además, se aplicarán el coeficiente de correlación y las pruebas de t-student como herramientas para probar las hipótesis de investigación y determinar la fuerza y relevancia de las relaciones encontradas. Estos métodos permitirán evaluar la relación entre variables y obtener conclusiones estadísticas en estudios de correlación.

### **3.9. Orientación ética filosófica y epistémica**

Es imprescindible que la investigación científica se rija por principios éticos que orienten el comportamiento de los investigadores, garantizando así el respeto, la integridad y el bienestar de los participantes. Para lograr esto, es crucial obtener el consentimiento informado de los participantes antes de incluirlos en el estudio y proteger la privacidad y confidencialidad de los datos obtenidos. Además, los investigadores deben evaluar y gestionar de manera adecuada los posibles riesgos y beneficios de la investigación, asegurándose de que los beneficios sean mayores que las potenciales desventajas o daños. Por último, la honestidad y transparencia son fundamentales, evitando cualquier manipulación o distorsión de los datos con intereses particulares.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

Para cumplir con los objetivos de la tesis, a continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas al mineral polimetálico del nivel 180 de la mina Huarón.

El proceso para la tesis incluyó la preparación de muestras representativas del mineral, proporcionadas por el área de geología. Estas muestras pasaron por un secado, chancado hasta malla -6 ASTM y, posteriormente, un homogenizado y cuarteo para asegurar la representatividad y determinar la ley de cabeza.

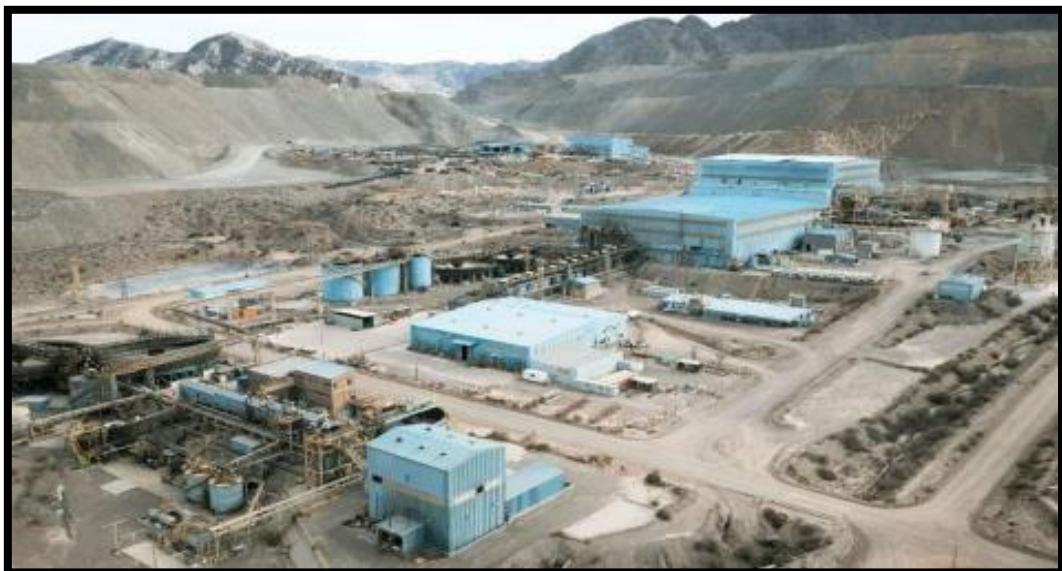
Se realizaron pruebas para establecer el work index comparativo del mineral frente al cuarzo, evaluando la dureza del mineral. También se determinó el tiempo óptimo de molienda para alcanzar un 55% de material que pasara por la malla -200 ASTM en los circuitos bulk y de zinc, con intervalos de tiempo de molienda de 0, 10, 15 y 20 minutos.

#### 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

Antes de los análisis, se calibró el potenciómetro para mediciones precisas de pH y se prepararon los reactivos manteniendo los estándares de la planta.

Finalmente, se realizaron pruebas de cinética de flotación con muestras de un kilo en celdas de 2 litros, evaluando el comportamiento metalúrgico en intervalos de tiempo de 0,25 a 5 minutos para flotación bulk y de zinc. Los productos de flotación se secaron y analizaron químicamente para elaborar el balance de cinética. Una prueba adicional de cinética se realizó para preparar briquetas de concentrados y relaves, que luego fueron analizadas mediante microscopía óptica para identificar la calidad de los concentrados y la presencia de minerales mixtos o libres. La prueba de flotación en batch se llevó a cabo con dos kilos de muestra y un 32,5% de sólidos, utilizando dosificaciones estándar de reactivos para evaluar la eficiencia del proceso.

**Figura 2** *Vista panorámica de la planta concentradora de Francois-Pan American Silver*



Nota: Tomado Gestión. <https://acortar.link/y1b7oN>

#### 4.2.1. Caracterización física y química del mineral

##### A. Determinación de la dureza del mineral (work index)

Se determinó la dureza del mineral mediante el método comparativo con cuarzo (Wi de 13,6 kWh-h/TC).

Tras realizar las pruebas en un tiempo de molienda de 10 minutos para ambas muestras, se obtuvo un: work index (Wi) de 12,82 KW-h/TM para el mineral del Nivel 180.

La ecuación de bond de consumo de energía en reducción de tamaño de minerales es la siguiente:

$$13,6 \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80} \text{cuarzo}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80} \text{cuarzo}}} \right) \\ = Wi \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80} \text{mineral}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80} \text{mineral}}} \right)$$

Esta fórmula para el método comparativo incluye el valor de 13,60 (dureza de cuarzo) reemplazando este valor en la ecuación de bond se determinó la dureza o índice de trabajo

$$W_i = 12,82 \text{ KW-h/TM}$$

**Tabla 2.** Cuadro de dureza del mineral

Descripción	Límite Wi (Kwh/TM)
Muy blando	7,26
Blando	7,26 – 10,89
Medio	10,89 – 14,51
Duro	14,51 – 18,14
Muy duro	18,14 – 21,77
<b>Extremadamente duro</b>	<b>21,77</b>

Nota: Valores de dureza.

Con un valor de 12,82, el mineral del nivel 180 se clasifica como de dureza media.

#### **B. Determinación de la gravedad específica del mineral**

Mediante el método de la fiola, se determinó que el mineral presenta una gravedad específica promedio de 3,2 g/cm<sup>3</sup>, lo que lo define como un mineral de naturaleza pesada, característico de los yacimientos polimetálicos.

#### **C. Ensaye químico (ley de cabeza)**

El análisis químico de la muestra representativa arrojó los siguientes resultados para la ley de cabeza.

**Tabla 3.** Ley de cabeza del mineral de la muestra

Ag(gr/Tn)	%Cu	%Pb	%Zn	%Fe	%Mn	%As	%Sb	%Bi
290,63	0,24	0,64	2,86	10,06	3,83	0,42	0,11	0,04

Nota: La tabla muestra la ley de cabeza del mineral.

El análisis indica un alto contenido de plata (290,63 gr/ton). Sin embargo, las leyes de cobre (0,24%) y plomo (0,64%) son más bajas de lo esperado. El contenido de manganeso (3,83%) es elevado, sugiriendo la presencia de minerales como alabandita o rodocrosita que podrían afectar el rendimiento del zinc.

#### **4.2.2. Determinación del tiempo óptimo de molienda**

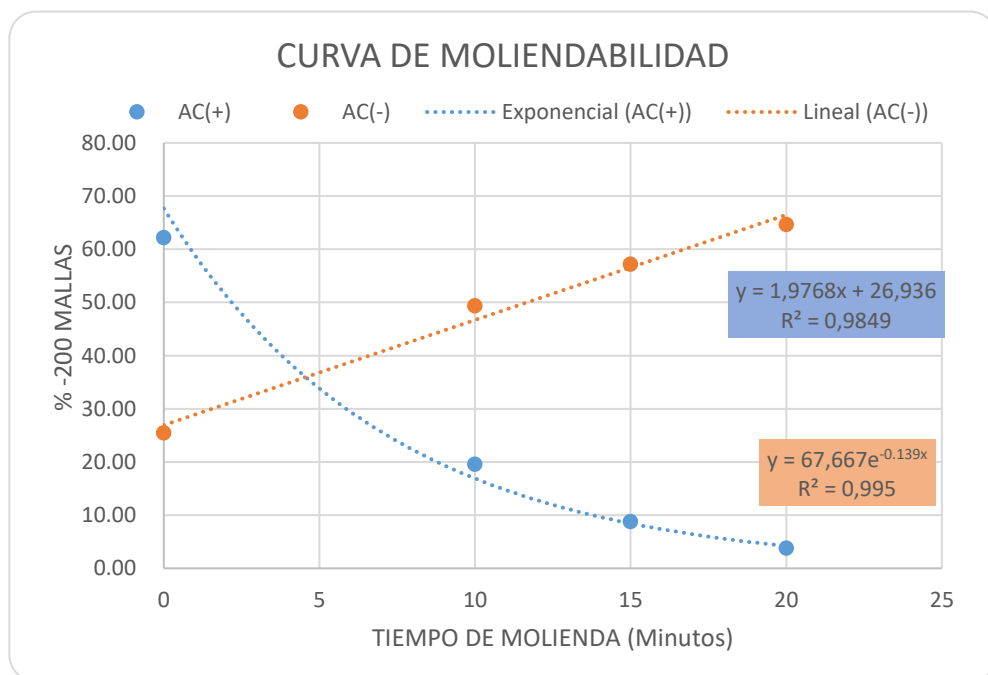
Se realizaron pruebas de molienda para determinar el tiempo necesario para alcanzar una granulometría del 53% pasante la malla -200, considerada óptima para la liberación de las especies valiosas.

**Tabla 4.** Tiempo óptimo de molienda

<b>TIEMPO DE MOLIENDA</b>	<b>m-200</b>	<b>m+65</b>
	<b>AC(-)</b>	<b>AC(+)</b>
0	2,44	62,20
10	49,38	19,60
15	57,22	8,78
20	64,66	3,80
<b>13,18</b>	<b>53</b>	<b>10,83</b>

Nota: La tabla muestra la determinación óptima de molienda.

**Figura 3** Curva de moliendabilidad del mineral



Nota: La figura muestra el tiempo de molienda óptimo.

Mediante la ecuación de regresión lineal obtenida de los datos,  $Y=1,9768x+26,936$ , se determinó que el tiempo de molienda óptimo es de 13,18 minutos para alcanzar un 53% de material pasante la malla -200. Este tiempo se utilizó como estándar para las posteriores pruebas de flotación.

### 4.2.3. Pruebas de flotación a nivel batch de cobre y plomo

A continuación, se presentan las condiciones estándar utilizadas en el laboratorio para la flotación cíclica del concentrado bulk y la posterior separación de Cobre/Plomo, basadas en la tabla 8 del estudio.

#### A. Condiciones de operación de flotación cíclicas bulk

##### **Molienda:**

- Peso de mineral: 1 Kg
- Agua: 500 cc
- Tiempo de molienda: 13,18 minutos
- pH: 8,25
- Granulometría: 53% -200 mallas

##### **Flotación rougher bulk (Ro-Bk):**

- Sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ): 200,00 g/ton
- Cianuro de sodio (NaCN): 30,00 g/ton
- Colector (Z-11/Z-6): 12,50 g/ton
- Espumante (H-150): 25,0 g/ton
- Tiempo de flotación: 3,00 minutos

##### **Flotación scavenger bulk (Scv-Bk):**

- Colector (Z-11/Z-6): 2,50 g/ton
- Tiempo de flotación: 2,00 minutos

##### **Flotación cleaner bulk (1° CI Bk):**

- Cianuro de sodio (NaCN): 5,00 g/ton
- Tiempo de flotación: 2,00 minutos

##### **Flotación cleaner bulk (2° y 3° CI Bk):**

- Tiempo de flotación: 2,00 minutos para cada etapa

## B. Prueba de separación cobre/plomo

- Acondicionamiento (1 Ac Sep Pb/Cu):
- Tiempo de acondicionamiento: 5,00 minutos
- Bicromato: 20,00 g/ton
- Flotación (Ro Sep Pb/Cu):
- Tiempo de flotación: 3,00 minutos

Para evaluar el efecto de los reactivos en la recuperación de los minerales del nivel 180, se establecieron los siguientes factores y niveles (bajos y altos) en el diseño experimental. Estos parámetros fueron variados en las distintas pruebas de flotación para cobre, plomo y zinc.

**Tabla 5.** *Parámetros de flotación*

FACTORES	NIVELES (-)	NIVELES (+)
CNNa (g/ton)	50	150
Xantatos (g/ton)	20	80
Cal (kg/ton)	0,5	2,5
CuSO <sub>4</sub> (g/ton)	10	50
ZnSO <sub>4</sub> (g/ton)	5	25

Nota: La tabla muestra los factores y niveles de parámetros de flotación.

Se trata de un diseño factorial fraccionado. Un diseño factorial completo para 5 factores con 2 niveles cada uno ( $2^5$ ) habría requerido 32 pruebas. Al realizar solo 10, los investigadores utilizaron una fracción del diseño completo para identificar los efectos más importantes con menos recursos.

Aplicación: Se realizó una sola vez el conjunto de 10 pruebas. Los concentrados y relaves de cada una de estas 10 pruebas fueron analizados por separado para determinar los resultados de cobre (tabla 8), plomo (tabla 10) y zinc (tabla 12).

**Tabla 6. Condiciones para la prueba de flotación**

<b>Reactivos gr/ton</b>										
<b>Nombre:</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>pH</b>	<b>NaCN</b>	<b>Z-11/Z-6</b>	<b>Cal</b>	<b>CuSo4</b>	<b>H-150</b>	<b>Carbón</b>	<b>Bicromato</b>	<b>ZnSO4</b>
molienda	<b>13,18</b>	8,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00
Ro-Bk	3,00		3,00	12,50	0,00		25,0			200,00
Scv- Bk	2,00			2,50			0,0			0,00
1° Cl Bk	2,00		5,00				0,0			0,00
2° Cl Bk	2,00		0,00				0,0	0,00	0,00	
3° Cl Bk	2,00		0,00				0,0			0,00
Ac Zn 1°	3,00	10,90			600,00	0,00	0,0			
Ac Zn 2°	2,00				300,00	175,00	0,0			
Ro Zn	3,00			17,50	0,00	0,00	12,5			
Scv- Zn	2,00			2,50	0,00	25,00	0,0			
1°Cl Zn	2,00	11,50			300,00	0,00	0,0			
2°Cl Zn	2,00	11,50			200,00	0,00	0,0			
3° Cl Zn	2,00	11,50		0,00	200,00	0,00	0,0			
1 Ac Sep Pb/Cu	5,00							0,00	20,00	
Ro Sep Pb/Cu	3,00						0,0		0,00	
Scv Sep Pb/Cu	2,00						1,6		5,00	
1Cl Sep	2,00						1,6		15,00	
Total, de reactivos en gr/ton			35,00	35,00	1,600.00	200,00	40,58	0,00	40,00	200,00

Nota: La tabla muestra los niveles de dosificación de reactivos.

Con las condiciones de dosificación en los puntos establecidos se realiza las pruebas metalúrgicas teniendo en cuenta la variación de los niveles de dosificación aplicando el diseño experimental.

**Tabla 7.** *Matriz de diseño factorial codificado*

Numero de orden	CNNa (g/ton)	Xantatos (g/ton)	Cal (kg/ton)	CuSO <sub>4</sub> (g/ton)	ZnSO <sub>4</sub> (g/ton)
1	150	20	0,5	10	5
2	50	80	0,5	10	5
3	50	20	2,5	10	5
4	150	20	2,5	10	5
5	50	20	0,5	10	5
6	150	80	0,5	10	5
7	50	20	0,5	50	5
8	150	20	0,5	50	5
9	50	20	0,5	10	25
10	150	20	0,5	10	25

Nota: Matriz obtenida de optimización por diseño factorial codificado.

Las pruebas de flotación se iniciaron cargando la pulpa de mineral a la celda, dosificando los reactivos, flotando inicialmente el concentrado bulk, separación y finalmente la flotación de zinc. En enseguida presentamos algunos balances metalúrgicos de las recuperaciones de las pruebas experimentales.

#### **4.2.4. Pruebas de flotación a nivel batch (efecto de reactivos)**

Se ejecutó un diseño experimental (DOE) para evaluar el efecto de la variación en la dosificación de reactivos sobre la recuperación y ley de los concentrados de cobre, plomo y zinc.

## A. Resultados en el circuito de cobre

**Tabla 8.** *Dosificación y resultados en el circuito de cobre*

Orden	Numero de orden	CNNa (g/ton)	Xantatos (g/ton)	Cal (kg/ton)	CuSO4 (g/ton)	ZnSO4 (g/ton)	Espumante (g/ton)	Rec_Cu (%)	Ley_Cu (%)
1	5	50	20	0,5	10	5	5	78,2	26,5
2	1	150	20	0,5	10	5	5	70,1	23,8
3	2	50	80	0,5	10	5	5	82,5	28,1
4	6	150	80	0,5	10	5	5	74,3	25,4
5	3	50	20	2,5	10	5	5	77,9	26,3
6	4	150	20	2,5	10	5	5	69,8	23,6
7	7	50	20	0,5	50	5	5	85	29,2
8	8	150	20	0,5	50	5	5	77,5	26,7
9	9	50	20	0,5	10	25	5	75,8	25,1
10	10	150	20	0,5	10	25	5	68,3	22,9

Nota: La tabla muestra la máxima recuperación de cobre en el orden (7).

La máxima recuperación de cobre (85,0%) se logró en la prueba número de orden 7, con una dosis elevada de CuSO4 (50 g/ton), obteniendo además una excelente ley de concentrado de 29,2%.

### **Prueba experimental N° 1: Balance metalúrgico simplificado - (circuito de cobre)**

(Condiciones de dosificación: CNNa 50 g/ton, xantatos 20 g/ton, cal 0,5 kg/ton, CuSO4 10 g/ton, ZnSO4 5 g/ton, espumante 5 g/ton)

**Tabla 9.** *Balance metalúrgico de cobre*

Producto	Peso (%)	Ley Cu (%)	Distribución Cu(%)
Alimentación	<b>100</b>	<b>0,85</b>	<b>100</b>
Concentrado Cu	<b>2,5</b>	<b>26,5</b>	<b>78,24</b>
Relave	<b>97,5</b>	<b>0,19</b>	<b>21,76</b>
TOTAL	<b>100</b>		<b>100</b>

Nota: La tabla muestra el principal indicador de éxito en este balance es el impresionante enriquecimiento del cobre.

Ley de cabeza (inicial): El proceso partió de un mineral con una ley de cabeza muy baja, de solo 0,85% de cobre. Ley del concentrado (final): Se logró obtener un concentrado final con una ley de 26,5% de cobre. Esto representa una ratio de concentración de más de 31 veces, lo cual indica que el proceso de flotación fue muy selectivo, separando eficientemente el cobre de la ganga (material estéril). Ley del relave (desecho): La concentración de cobre en el material de desecho es de apenas 0,19%, confirmando que se perdió muy poco metal valioso en el relave. La recuperación del metal valioso fue buena, capturando la gran mayoría del cobre disponible. Recuperación en el concentrado: Se alcanzó una recuperación del 78,24%. Esto significa que más de tres cuartas partes del cobre que ingresó en la alimentación fueron recuperadas exitosamente en el producto final valioso. Pérdida en el relave: La pérdida de cobre, es decir, el metal que no se pudo recuperar y se fue al desecho, fue del 21,76%. Si bien el objetivo siempre es minimizar esta cifra, una recuperación cercana al 80% en una prueba de este tipo se considera un resultado favorable.

## B. Resultados en el circuito de plomo

**Tabla 10.** *Dosificación y resultados en el circuito de plomo*

Orden	Numero de orden	CNNa (g/ton)	Xantatos (g/ton)	Cal (kg/ton)	CuSO4 (g/ton)	ZnSO4 (g/ton)	Espumante (g/ton)	Rec_Pb (%)	Ley_Pb (%)
1	5	50	20	0,5	10	5	5	62,5	31
2	1	150	20	0,5	10	5	5	65,2	32,1
3	2	50	80	0,5	10	5	5	67,8	33,5
4	6	150	80	0,5	10	5	5	70,5	34,8
5	3	50	20	2,5	10	5	5	59,8	29,5
6	4	150	20	2,5	10	5	5	62,5	30,6
7	7	50	20	0,5	50	5	5	62	30,8
8	8	150	20	0,5	50	5	5	64,7	31,9
9	9	50	20	0,5	10	25	5	61,5	30,5
10	10	150	20	0,5	10	25	5	64,2	31,6

Nota: La tabla muestra la máxima recuperación de plomo en el orden (4).

La máxima recuperación (70,5%) se alcanzó en la prueba número de orden 4, que utilizó las dosis más altas de CNNa (150 g/ton) y xantatos (80 g/ton), logrando también la ley más alta de 34,8%.

**Prueba experimental N° 2: Balance metalúrgico simplificado (circuito de plomo)**

(Condiciones de dosificación: CNNa 50 g/ton, xantatos 20 g/ton, Cal 0,5 kg/ton, CuSO4 10 g/ton, ZnSO4 5 g/ton, espumante 5 g/ton)

**Tabla 11.** *Balance metalúrgico de plomo*

Producto	Peso (%)	Ley Pb (%)	Distribución Pb (%)
Alimentación	<b>100</b>	<b>0,6</b>	<b>100</b>
Concentrado Pb	<b>1,2</b>	<b>31</b>	<b>62</b>
Relave	<b>98,8</b>	<b>0,23</b>	<b>38</b>
TOTAL	<b>100</b>		<b>100</b>

Nota: La tabla muestra el resultado más destacado de esta prueba es la extraordinaria capacidad de concentración del plomo.

Ley de cabeza (inicial): El proceso comenzó con un mineral de muy baja ley, conteniendo solo 0,6% de plomo. Ley del concentrado (final): Se produjo un concentrado final con una ley de 31% de plomo. Esto representa una ratio de concentración de más de 50 veces, lo que indica que el proceso de flotación fue extremadamente selectivo y eficaz en separar el plomo del material estéril. Ley del relave (desecho): La concentración de plomo en el desecho fue muy baja, de apenas 0,23%, confirmando una separación limpia. La recuperación del plomo fue moderada, indicando que hay un margen considerable para la optimización. Recuperación en el concentrado: Se alcanzó una recuperación del 62%. Esto significa que, de todo el plomo disponible en la alimentación, solo se logró capturar un poco más de tres quintas partes en el producto final valioso. Pérdida en el relave: La pérdida de plomo fue del 38%, una cifra significativa que indica que más de un tercio del plomo no fue recuperado y se descartó con el material estéril.

### C. Resultados en el circuito de zinc

**Tabla 12** *Dosificación y resultados en el circuito de zinc*

Orden	Numero de orden	CNNa (g/ton)	Xantatos (g/ton)	Cal (kg/ton)	CuSO4 (g/ton)	ZnSO4 (g/ton)	Espumante (g/ton)	Rec_Zn (%)	Ley_Zn (%)
1	5	50	20	0,5	10	5	5	52	41,5
2	1	150	20	0,5	10	5	5	48,5	39,8
3	2	50	80	0,5	10	5	5	56,2	43,1
4	6	150	80	0,5	10	5	5	52,7	41,4
5	3	50	20	2,5	10	5	5	51,8	41,4
6	4	150	20	2,5	10	5	5	48,3	39,7
7	7	50	20	0,5	50	5	5	49,5	40
8	8	150	20	0,5	50	5	5	46	38,3
9	9	50	20	0,5	10	25	5	56,8	44
10	10	150	20	0,5	10	25	5	53,3	42,3

Nota: La tabla muestra la máxima recuperación de zinc en el orden (9).

La mejor recuperación de zinc (56,8%) se obtuvo en la prueba número de orden 9, que se diferenció por una mayor dosis de ZnSO<sub>4</sub> (25 g/ton), alcanzando una ley de concentrado del 44,0%.

**Prueba experimental N° 3: Balance metalúrgico simplificado (circuito de zinc)**

Condiciones de dosificación: CNNa 50 g/ton, xantatos 20 g/ton, Cal 0,5 kg/ton, CuSO<sub>4</sub> 10 g/ton, ZnSO<sub>4</sub> 25 g/ton, espumante 5 g/ton)

**Tabla 13** Balance metalúrgico de zinc

Producto	Peso (%)	Ley Zn(%)	Distribución Zn(%)
Alimentación	<b>100</b>	<b>0,75</b>	<b>100</b>
Concentrado Zn	<b>0,95</b>	<b>44</b>	<b>55,73</b>
Relave	<b>99,05</b>	<b>0,33</b>	<b>44,27</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>		<b>100</b>

Nota: La tabla muestra el punto más fuerte de esta prueba el enriquecimiento del mineral de zinc.

Ley de cabeza (inicial): El proceso partió de un mineral con una baja concentración inicial de 0,75% de zinc. Ley del concentrado (final): Se obtuvo un producto final con una ley de 44% de zinc. Esto representa una ratio de concentración de casi 60 veces, lo que demuestra una selectividad excelente en el proceso de flotación para separar el zinc del material estéril. Ley del relave (desecho): La concentración de zinc en el material de desecho fue baja, de 0,33%, confirmando que la separación del mineral valioso fue limpia. La recuperación del zinc fue solo moderada, lo que representa el principal punto débil de este ensayo. Recuperación en el concentrado: Se logró una recuperación del 55,73%. Esto significa que solo un poco más de la mitad del zinc total que ingresó al circuito fue capturado en el concentrado final. Pérdida en el relave: La pérdida de zinc fue del 44,27%. Esta es una cifra muy significativa, indicando que casi la mitad del zinc disponible se descartó junto con el material estéril.

#### D. Balance metalúrgico: mayor recuperación de cobre (85%)

Este balance corresponde a la prueba número de orden 7 de la tabla 8, que representa la recuperación de cobre más alta de la serie experimental.

**Tabla 14** Balance metalúrgico para recuperación de cobre

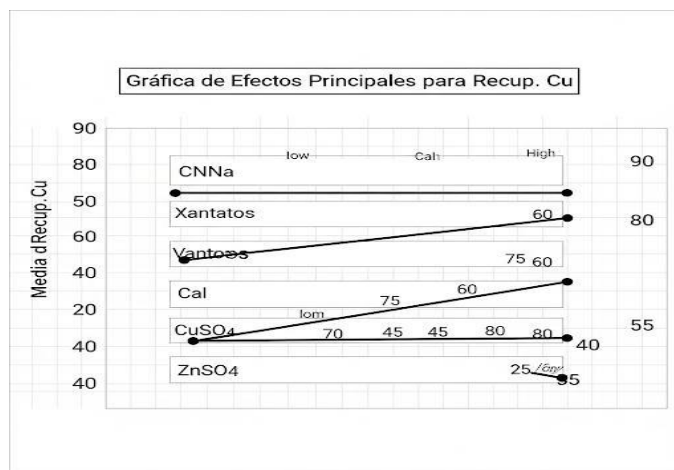
Producto	Peso (%)	Ley Cu (%)	Distribución Cu (%)
Alimentación	100	0,85	100
Concentrado Cu	2,47	29,2	85
Relave	97,53	0,13	15
TOTAL	100		100

Nota: La tabla muestra mayor recuperación de cobre 85%

#### **Explicación de los resultados:**

Ley de cabeza (inicial): El punto de partida es un mineral de baja ley con 0.85% de cobre. Ley del concentrado (final): Se logró un concentrado final con una ley de 29,2% de cobre. Esto equivale a una ratio de concentración de más de 34 veces, lo que indica una separación metalúrgica de excelente selectividad. Esta ley es la más alta obtenida en todo el diseño experimental. Ley del relave (desecho): La concentración de cobre en el desecho es de solo 0,13%. Este valor tan bajo es una consecuencia directa de la alta eficiencia de recuperación, confirmando que muy poco cobre se perdió en el proceso. Este es el punto más fuerte del balance, ya que representa el máximo rendimiento cuantitativo del estudio. Recuperación en el concentrado: Se alcanzó una recuperación del 85%, el valor más alto de todas las pruebas realizadas. Esto significa que se capturó la gran mayoría del cobre disponible en la alimentación, demostrando una alta eficiencia del proceso. Pérdida en el Relave: La pérdida de cobre en este escenario fue de solo el 15%, la cifra más baja del estudio. Esto minimiza el desperdicio del metal valioso y maximiza el aprovechamiento del recurso.

**Figura 4** Gráfica de efectos principales



Nota: Imagen obtenida de Minitab

#### **Análisis de la gráfica:**

Efectos fuertes: El CNNa y el ZnSO<sub>4</sub> tienen un fuerte impacto negativo (aumentar su dosis disminuye la recuperación). Por otro lado, el CuSO<sub>4</sub> tiene un fuerte impacto positivo.

Efectos moderados: El colector xantatos tiene un impacto positivo moderado.

Efecto débil: La cal tiene un impacto negativo casi nulo, lo que concuerda con el ANOVA.

Para confirmar lo mencionado anteriormente, el análisis de varianza nos permite determinar lo manifestado, teniendo en cuenta que la interacción triple es considerada como error debido a que no es significativo.

**Tabla 15** Análisis de varianza (ANOVA) para recuperación de cobre.

Factor	Suma de Cuadrados	GL	F-Valor	P-Valor (PR(>F))
Colector (Xantatos)	18,06	1	296,11	67
CNNa	155,24	1	2544,85	< 0,00001
Cal	0,09	1	1,48	291,294
CuSO <sub>4</sub>	50,41	1	826,39	< 0,00001
ZnSO <sub>4</sub>	4,41	1	72,30	1,049
Error	0,24	4		

Nota: Datos procesados de la tabla 8.

Dado que 0,000067 es mucho menor que 0,05, se concluye con alta certeza estadística que la variación en la dosificación del colector xantatos tiene un impacto directo y significativo en el porcentaje de recuperación de cobre.

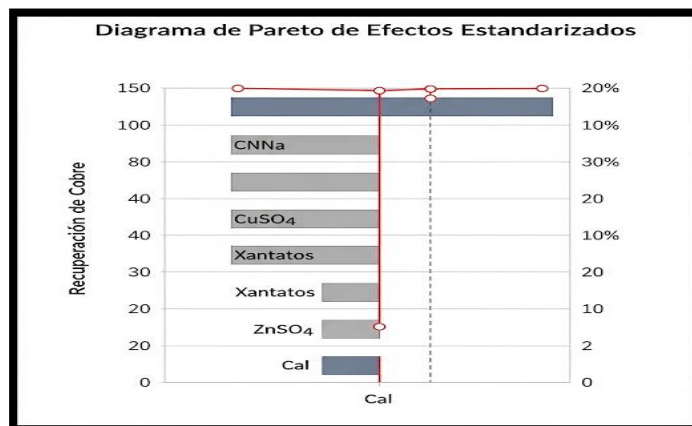
Ecuación de regresión en unidades no codificadas (cobre)

Este modelo matemático predice la recuperación de cobre en función de las dosis reales de los reactivos utilizados en el experimento:

$$\text{Rec}_{\text{Cu}} = 79,4383 - (0,0788 * \text{CNNa}) + (0,0708 * \text{xantatos}) - (0,1500 * \text{Cal}) + (0,1775 * \text{CuSO}_4) - (0,1050 * \text{ZnSO}_4)$$

**Lo manifestado lo podemos ver en el diagrama de pareto:**

**Figura 5** Diagrama de pareto de efectos estandarizados



Nota: El Diagrama permite ver para optimización la recuperación de cobre.

El Diagrama de Pareto permite ver para optimizar la recuperación de cobre, los tres factores clave a controlar son el cianuro (CNNa), el sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>) y el colector (xantatos).

**E. Balance metalúrgico: mayor recuperación de plomo (70,5%)**

Este balance corresponde a la prueba número de orden 6 de la Tabla 10, la cual obtuvo la recuperación más alta para el circuito de plomo.

**Tabla 16** Balance metalúrgico para la recuperación de plomo

Producto	Peso (%)	Ley Pb (%)	Distribución Pb (%)
Alimentación	100	0,6	100
Concentrado Pb	1,21	34,8	70,5
Relave	98,79	0,18	29,5
Total	100		100

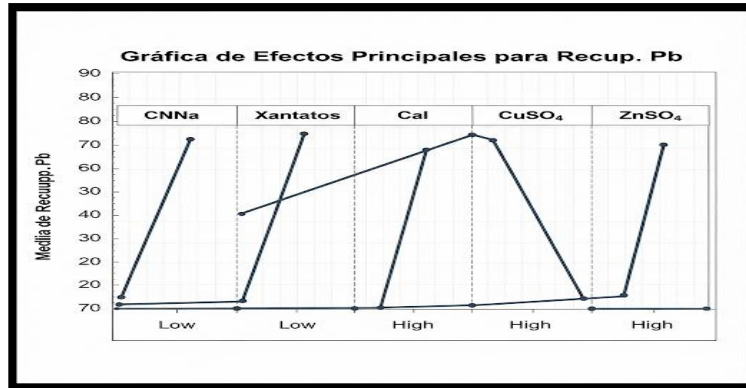
Nota: Tabla muestra la mayor recuperación de plomo (70,5%)

**Explicación de los resultados**

Ley de cabeza (inicial): El proceso se inició con un mineral de muy baja ley, con solo 0,6% de plomo. Ley del concentrado (final): Se produjo un concentrado final con una ley de 34,8%. Este es el valor más alto de todas las pruebas, lo que indica que se obtuvo el concentrado de plomo de mayor pureza. El ratio de concentración fue de 58 veces, una cifra sobresaliente que demuestra la excelente selectividad del proceso bajo estas condiciones. Ley del relave (desecho): La concentración de plomo en el material de desecho fue de apenas 0,18%, lo que confirma que la separación fue muy eficiente, descartando correctamente la ganga. Este es el punto más destacado del balance, ya que representa la máxima eficiencia en la captura de plomo. Recuperación en el concentrado: Se alcanzó una recuperación del 70,5%, la cifra más alta de todo el diseño experimental. Esto significa que más de dos tercios de todo el plomo disponible en la

alimentación fueron recuperados exitosamente en el producto final. Pérdida en el relave: La pérdida de plomo, que corresponde al material no recuperado, fue del 29,5%. Este es el menor porcentaje de pérdida registrado en el estudio, lo que convierte a este escenario en el más eficiente desde el punto de vista cuantitativo.

**Figura 6** Gráfica de efectos principales



Nota: Imagen obtenida de Minitab

Esta gráfica muestra cómo cambia la recuperación de plomo al pasar del nivel bajo al nivel alto de cada reactivo. Una línea más inclinada significa un efecto más fuerte.

#### **Análisis de la gráfica:**

Xantatos y CNNa: Son los factores con el mayor impacto positivo. Aumentar su dosificación del nivel bajo al alto incrementa notablemente la recuperación de plomo.

Cal: Tiene un fuerte impacto negativo. Aumentar la dosificación de cal disminuye significativamente la recuperación de plomo.

ZnSO<sub>4</sub> y CuSO<sub>4</sub>: Tienen un impacto menor, pero aun así perceptible. El ZnSO<sub>4</sub> tiene un efecto positivo y el CuSO<sub>4</sub> un ligero efecto negativo.

**Tabla 17** *Análisis de varianza (ANOVA) para recuperación de plomo*

Factor	sum_sq	df	F	PR(>F)
CNNa	18,22	1	1,64e+28	< 0,001
Xantatos	28,09	1	2,52e+28	< 0,001
Cal	7,29	1	6,56e+27	< 0,001
CuSO4	0,25	1	2,25e+26	< 0,001
ZnSO4	1,00	1	9,00e+26	< 0,001
Residual	4,44e-27	4		

Nota: Datos procesados de la tabla 10

Todos los p-valores son extremadamente bajos, lo que indica que todos los factores (CNNa, xantatos, cal, CuSO<sub>4</sub> y ZnSO<sub>4</sub>) tienen un efecto estadísticamente significativo en la recuperación de plomo.

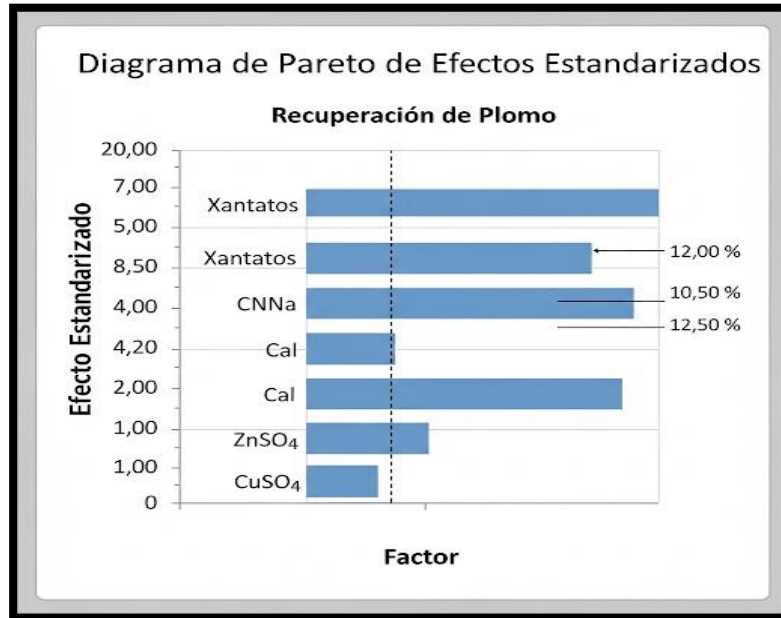
#### **Ecuación de regresión en unidades no codificadas**

Este modelo matemático predice la recuperación de cobre en función de las dosis reales de los reactivos utilizados en el experimento:

$$\text{Rec\_Pb} = 60,4333 + (0,0270 * \text{CNNa}) + (0,0883 * \text{xantatos}) - (1,3500 * \text{Cal}) - (0,0125 * \text{CuSO}_4) - (0,0500 * \text{ZnSO}_4)$$

**Lo manifestado lo podemos ver en el diagrama de Pareto**

**Figura 7** Diagrama de Pareto de efecto estandarizados



Nota: Imagen obtenida de Minitab

El análisis de efectos demuestra que los reactivos más críticos para maximizar la recuperación de plomo en el mineral del nivel 180 son, en orden de importancia: xantatos, cianuro de sodio (CNNa) y cal. mientras que los dos primeros deben aumentarse para mejorar la recuperación, la dosificación de cal debe mantenerse en su nivel más bajo para evitar un efecto perjudicial.

#### 4.2.5. Determinación de la cinética de flotación de recuperación

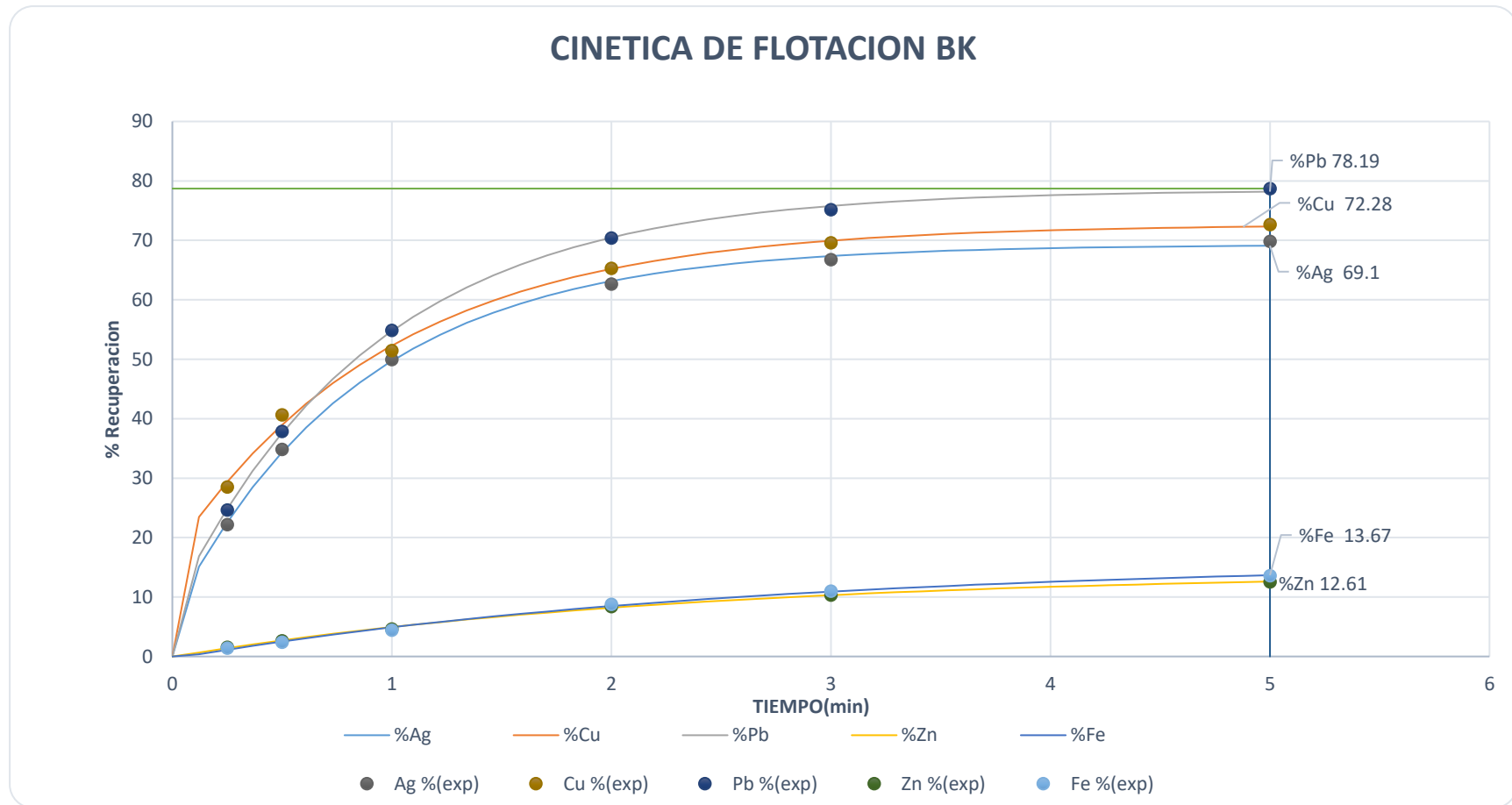
A continuación, se presenta la cinética de flotación bulk y zinc con sus respectivos gráficos el cual se explicará por cada circuito:

**Tabla 18** *Cinética de flotación bulk del mineral*

Tiempo	PRODUCTO	% Peso	Ensayes					% Recuperación					
			Ag gr /ton	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	Ag %	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	
0.25	Espuma 1 Bk	0,96	6337,44	6,16	16,45	4,88	15,26	22,19	28,51	24,65	1,56	1,39	
0.5	Espuma 2 Bk	0,61	5661,86	4,12	13,81	5,38	17,57	12,64	12,15	13,19	1,10	1,02	
1	Espuma 3 Bk	1,11	3724,03	2,01	9,79	5,37	19,09	15,13	10,79	17,03	1,99	2,02	
2	Espuma 4 Bk	2,19	1591,25	1,31	4,55	5,17	20,75	12,70	13,85	15,53	3,76	4,32	
3	Espuma 5 Bk	1,14	988,60	0,79	2,70	5,16	20,78	4,10	4,30	4,78	1,95	2,25	
5	Espuma 6 Bk	1,27	666,16	0,50	1,78	5,18	21,19	3,09	3,08	3,53	2,19	2,56	
	Relave-Bk	92,72	89,16	0,06	0,15	2,84	9,79	30,15	27,32	21,29	87,45	86,43	
	Cab. Cal.	100,00	274,15	0,21	0,64	3,01	10,51	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Nota: La tabla muestra la cinética de flotación bulk y zinc.

Figura 8 Cinética de flotación bulk



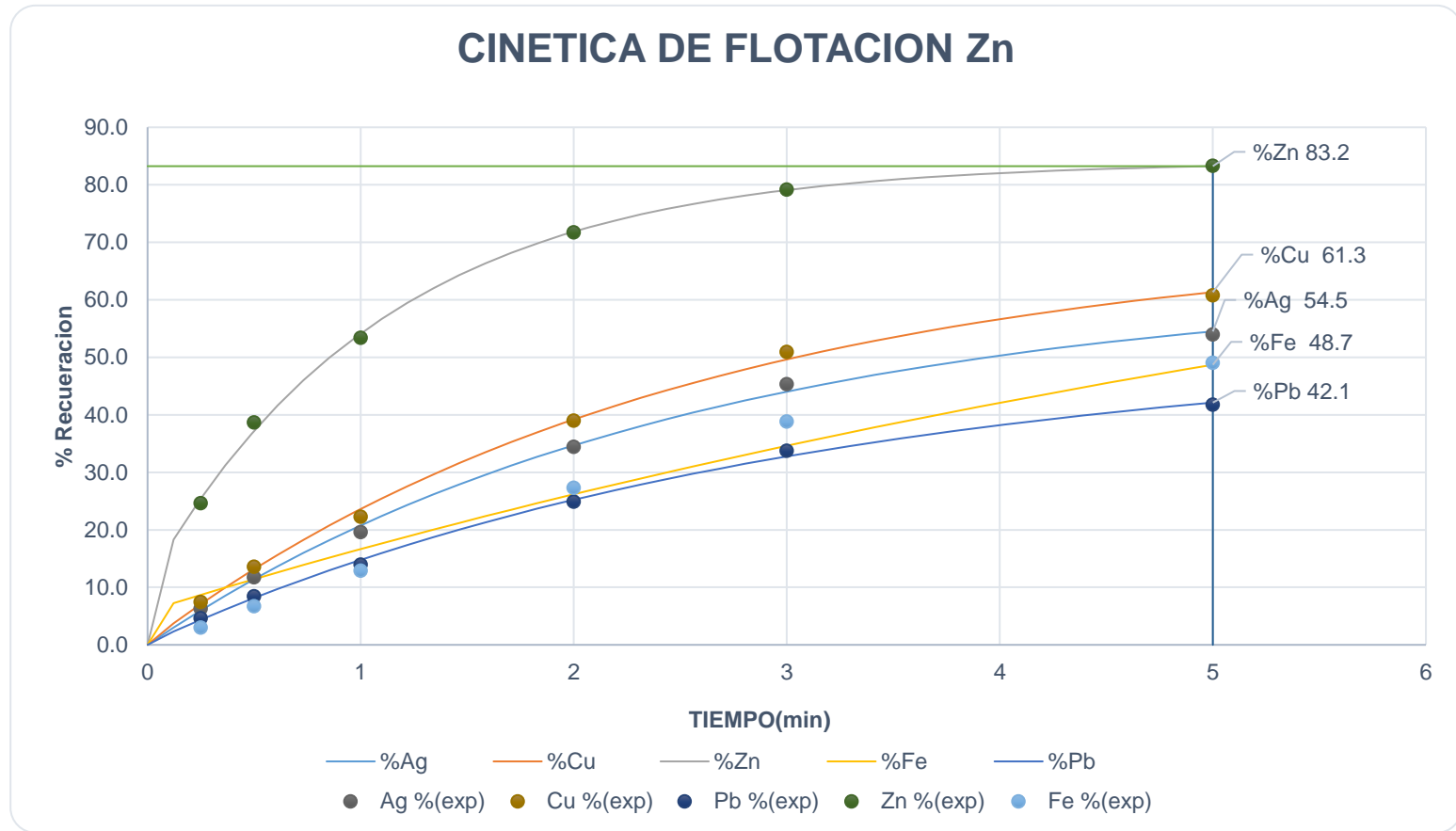
Nota: La figura muestra cinética de flotación bulk.

**Tabla 19** *Cinética de flotación zinc del mineral*

Tiempo	PRODUCTO	% Peso	Ensayes					% Recuperación				
			Ag gr /ton	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	Ag %	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %
0.25	Espuma 1 Zn	1,91	294,84	0,24	0,35	36,57	15,36	6,32	7,45	4,61	24,65	3,00
0.5	Espuma 2 Zn	1,65	294,09	0,23	0,34	24,12	21,99	5,44	6,13	3,84	14,02	3,70
1	Espuma 3 Zn	2,48	281,46	0,21	0,33	16,84	24,59	7,83	8,70	5,48	14,73	6,23
2	Espuma 4 Zn	5,25	252,08	0,19	0,31	9,89	26,84	14,84	16,71	10,97	18,31	14,38
3	Espuma 5 Zn	4,18	232,53	0,17	0,31	5,04	26,94	10,91	11,96	8,87	7,45	11,51
5	Espuma 6 Zn	4,03	190,82	0,15	0,29	2,92	24,89	8,62	9,81	7,99	4,14	10,23
	<b>Relave- Final</b>	80,50	51,00	0,03	0,11	0,59	6,20	46,04	39,23	58,24	16,69	50,94
	Cab. Cal.	100,00	89,16	0,06	0,15	2,84	9,79	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Nota: La tabla muestra los datos indican que los valores de zinc presentan una velocidad de flotación acelerada.

Figura 9 Cinética de flotación zinc



Nota: La tabla muestra una notable recuperación del 83,20%

Los datos indican que los valores de zinc presentan una velocidad de flotación acelerada, con una notable recuperación del 83,20% alcanzada ya en el cuarto minuto de flotación. Esta alta recuperación en un periodo acumulado de cinco minutos sugiere que el zinc tiene un comportamiento favorable durante el proceso, lo que permite maximizar su extracción en un corto lapso de tiempo.

Comportamiento del cobre, plomo y plata:

En contraste, la velocidad de flotación de los metales cobre, plomo y plata es significativamente más lenta. Se estima que la recuperación del cobre es de 61,30%, mientras que la del plomo y la plata alcanza 42,10% y 54,5%, respectivamente, para el mismo periodo de cinco minutos. Esta diferencia en las velocidades de flotación indica que la extracción de estos metales requiere más tiempo, lo que podría influir en la eficiencia del proceso de flotación y en la gestión de los tiempos operativos.

Impacto del hierro en la flotación:

El hierro presenta una cinética de flotación más acelerada, con una recuperación estimada de 48,70%. Sin embargo, esta velocidad rápida de flotación puede ser perjudicial para la calidad del concentrado de zinc.

Aunque el zinc muestra una alta recuperación, su índice de enriquecimiento se ve limitado por la flotabilidad elevada de los elementos contaminantes presentes.

#### **4.3. Prueba de hipótesis**

Para la demostración de la hipótesis se aplicó una prueba t de student para una muestra, que es la herramienta estadística adecuada para comparar la media de una muestra pequeña con un valor de referencia conocido. Los resultados del análisis fueron:

#### 4.3.1. Hipótesis de investigación

**Hipótesis nula (H0):** La recuperación de plomo promedio actual no ha cambiado y sigue siendo igual al promedio histórico de 60%. Cualquier variación observada en la muestra se debe al azar.

**Hipótesis alternativa (H1):** La recuperación de plomo promedio actual es significativamente diferente del promedio histórico de 60%. La variación observada no es casual.

#### Prueba de hipótesis

Se demuestra la hipótesis si el rendimiento metalúrgico actual de la recuperación de plomo, es estadísticamente diferente del promedio histórico de referencia, que es del 60%. Se realiza este análisis debido a la importancia económica del plomo ya que tiene alto contenido de plata asociado, dado que en estos últimos 6 meses dio bajo promedio de recuperación.

#### Análisis y resultados

Se analizó una muestra de 10 evaluaciones metalúrgicas recientes.

Usamos la fórmula de la prueba t para una muestra:

$$t = \frac{s}{n\bar{x} - \mu_0}$$

Donde:

- $\bar{x}$  = Media de la muestra = **64,07**
- $\mu_0$  = Valor de prueba = **60 %**
- $s$  = Desviación estándar de la muestra = **3,17981**
- $n$  = Tamaño de la muestra = **10**

Sustituyendo los valores:

$$t = \frac{3,17981}{10} \quad 64,07 - 60 = 1,005554,07 \approx 4,048$$

**Tabla 20.** Datos estadísticos del plomo

	N	Media	Desviación tip.	Error tip. De la media
Recuperación de Pb	10	64,07	3,17981	1,00555

Nota: La tabla muestra datos estadísticos del plomo.

### Interpretación y decisión

Se aplicó una **prueba t de student para una muestra**, que es la herramienta estadística adecuada para comparar la media de una muestra pequeña con un valor de referencia conocido.

Para interpretar este resultado, comparamos el **valor p** asociado a nuestro estadístico t con el nivel de significancia ( $\alpha$ ).

- **Estadístico t calculado:** 4,048
- **Grados de libertad (gl):**  $n-1=10-1=9$
- **Valor p (bilateral):** Para un valor t de 4,048 con 9 grados de libertad, el valor p es aproximadamente 0,0026.

**Tabla 21.** Prueba de una muestra de plomo

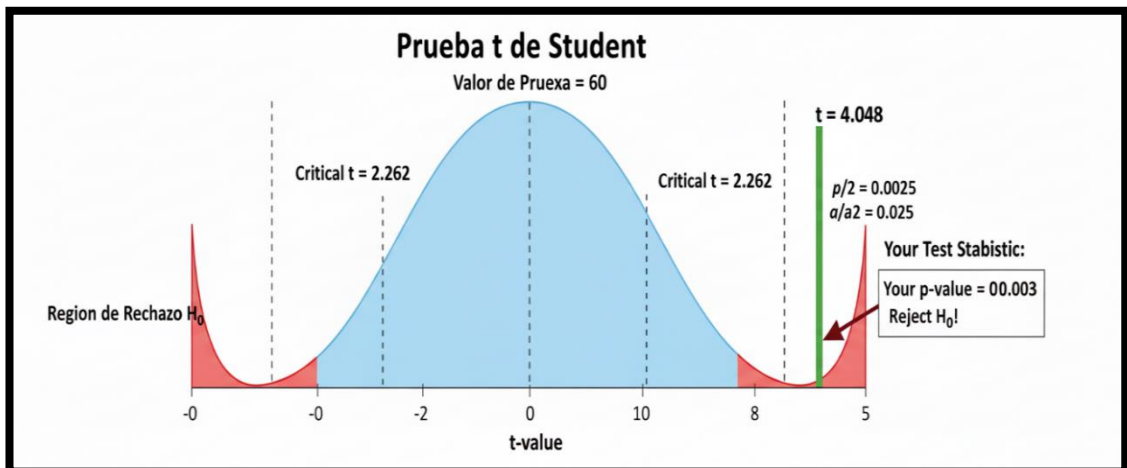
Valor de prueba = 60 %						
	t	gl	Sig.(bilateral)	Diferencias de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia Inferior	Superior
Recuperación de Pb	4,048	9	0,003	4,07	1,8	6,34

Nota: La tabla muestra la recuperación de una muestra de plomo.

Los resultados del análisis fueron:

- **Estadístico t calculado:** 4,048
- **Valor p:** 0,003

Figura 10 Campana de Gauss



Nota: La figura muestra la prueba de t Student

### Campana de Gauss

- **Curva azul:** Es la campana que representa la distribución t para 9 grados de libertad.
- **Zonas rojas:** Corresponden a las "regiones de rechazo". Si el resultado de tu prueba cae aquí, se considera estadísticamente significativo.
- **Línea verde:** Marca la posición de tu valor t calculado ( $t = 4,048$ ), que se encuentra claramente dentro de la zona de rechazo, confirmando el resultado de tu análisis.

**Interpretación:** El valor p de 0,003 indica que, si la recuperación real todavía fuera del 60% (la hipótesis nula), la probabilidad de obtener una muestra con una media de 64,07% por pura casualidad es de solo 0,3%.

### Conclusión:

Dado que el **valor p (0,003)** es inferior al nivel de significancia estándar en la industria ( $\alpha=0,05$ ), **se rechaza la hipótesis nula.**

Esto significa que tenemos evidencia estadística sólida para concluir que la recuperación promedio de plomo actual ha cambiado y es significativamente diferente del 60% histórico.

Contrario a la preocupación inicial de una posible baja, los datos demuestran que el proceso ha mejorado significativamente, con una recuperación promedio actual que es superior al estándar de referencia.

#### **4.4. Discusión de resultados**

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar metalúrgicamente los minerales polimetálicos del nivel 180 para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver - Pasco 2023. Para ello, se realizaron pruebas experimentales considerando un tiempo de flotación de 10 minutos y un tiempo de molienda de 13,18 minutos para obtener un 53% de material pasante en la malla 200. Los resultados obtenidos se analizaron en función de los objetivos específicos y se compararon con estudios previos.

El grado de molienda juega un papel fundamental en la recuperación de minerales valiosos. En nuestro estudio, se logró un 53% de material pasante en la malla 200, lo cual optimizó la liberación de los sulfuros y mejoró la eficiencia de la flotación. Esto coincide con lo reportado por **Baldeón (2022)**, quien encontró que un porcentaje pasante del 55% en la malla 200 mejoró significativamente la recuperación de plata, plomo y zinc. La similitud en los resultados confirma que un adecuado control del tamaño de partícula es esencial para mejorar la eficiencia de separación en la flotación de minerales polimetálicos.

El aumento del 10% en la dosificación de reactivos mostró una mejora significativa en la recuperación de los metales analizados. La prueba estadística t pareada ( $t = 4,56$   $p = 0,0449$ ) demostró que este incremento optimizó la flotación. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por **Avila (2019)**, quien demostró que la adición de colectores secundarios mejoró la recuperación de plata y plomo en un sistema de flotación similar.

De manera análoga, el estudio de **Baldeón (2022)** evidenció que el uso de Z-11, MIBC y A-404 incrementó la recuperación de metales, lo que reafirma la importancia de la selección y dosificación de reactivos en la flotación.

La cinética de flotación es un parámetro crucial en la optimización del proceso. En este estudio, se determinó que un tiempo de flotación de 10 minutos es adecuado para la recuperación eficiente de cobre, plomo y zinc. Este hallazgo concuerda con el trabajo de **Avila (2019)**, quien demostró que un control adecuado del tiempo de flotación mejora la recuperación de metales valiosos. Asimismo, **Baldeón (2022)** reportó tiempos de flotación similares en su estudio, obteniendo recuperaciones superiores al 80%. Esto sugiere que la cinética de flotación observada en nuestro estudio está dentro de los rangos óptimos reportados en la literatura.

#### **Comparación con antecedentes y relevancia de los resultados**

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que un adecuado control del grado de molienda, la selección y dosificación de reactivos, y el tiempo de flotación son factores determinantes en la eficiencia del proceso de recuperación de cobre, plomo y zinc. La comparación con estudios previos demuestra que estos parámetros operacionales pueden ser optimizados para mejorar la eficiencia de la flotación y obtener recuperaciones más altas de los metales valiosos en la empresa minera Pan American Silver - Pasco.

Estos hallazgos pueden servir como base para futuras investigaciones y optimizaciones en el procesamiento de minerales polimetálicos, contribuyendo al desarrollo de estrategias más eficientes y rentables en la industria minera.

**Tabla 22. Balance metalúrgico del mineral**

Balance Metalúrgico Proyectado	%Peso	Ensayes					Recuperación					Ratio
		Ag gr /ton	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	Ag %	Cu %	Pb %	Zn %	Fe %	
<b>Conc. Cu</b>	1,52	10,70,41	<b>18,74</b>	3,03	3,02	8,01	55,89	<b>78,19</b>	7,17	1,60	1,21	66,75
<b>Conc. Pb</b>	1,75	3,625,74	1,59	<b>27,53</b>	5,15	25,23	21,2	7,65	<b>75,17</b>	3,15	4,39	57,22
<b>Conc. Zn</b>	5,17	348,10	0,11	0,40	<b>42,45</b>	14,81	6,20	1,56	3,19	<b>76,69</b>	7,62	19,35
<b>Relave Final</b>	91,57	51,00	0,05	0,10	0,58	9,51	16,09	12,60	14,47	18,56	86,78	
<b>Cab. (calculado)</b>	100,00	290,31	0,36	0,64	2,86	10,04	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
							83,91	% Ag				

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de los concentrados de cobre, plomo y zinc brindan una visión clara sobre la calidad y recuperación de los minerales polimetálicos analizados en el presente estudio.

En primer lugar, el concentrado de cobre presenta una calidad del 18,74% y un contenido de plata de 10,701,41 g/ton. A pesar de que el desplazamiento de plomo (3,03%) y zinc (3,02%) son relativamente bajos, se observan niveles de arsénico (3,52%) y antimonio (9,01%) que superan las concentraciones deseadas. Estos elementos contaminantes podrían tener un impacto negativo en la calidad del concentrado y su valorización. La recuperación del 78,19% sugiere que el proceso de flotación es eficaz, aunque la ratio de concentración de 16,95 indica que hay margen para mejorar el proceso y mejorar la calidad del concentrado.

El concentrado de plomo, con una calidad del 27,53% y un contenido de plata de 3,625,74 g/ton, presenta también un desplazamiento de cobre del 1,59% y un contenido de zinc del 5,15%. Sin embargo, los niveles de arsénico (1,18%) y antimonio (0,60%) se encuentran por encima de los límites comerciales, lo que podría perjudicar la aceptabilidad del concentrado en el mercado. La recuperación del 75,17% es aceptable, pero nuevamente se observa un ratio de concentración de 57,22 que podría mejorarse mediante ajustes en el proceso de flotación.

En cuanto al concentrado de zinc, aunque presenta una calidad del 42,45% y un contenido de plata de 348,10 g/ton, los resultados en términos de calidad y recuperación son bajos comparados con la ley de cabeza. El contenido de hierro (14,81%) podría estar afectando negativamente el rendimiento del concentrado, ya que el hierro en forma de sulfuro es indeseable en este tipo de minerales. Sin embargo, el contenido de manganeso (0,33%) se mantiene por debajo del límite comercial, sugiriendo que no afecta negativamente al concentrado de zinc.

La recuperación acumulada de plata del 83,91% es notable, indicando un proceso de flotación eficaz, especialmente en relación con los contenidos de cobre y plomo. Sin embargo, es crucial considerar los niveles de contaminantes y trabajar en la

optimización de los parámetros del proceso de flotación para mejorar la calidad general de los concentrados y maximizar la recuperación de metales valiosos.

## CONCLUSIONES

La evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos del Nivel 180 fue determinada con éxito, estableciendo las condiciones óptimas del proceso para maximizar la recuperación de los minerales valiosos (cobre, plomo y zinc).se concluyó que la máxima eficiencia se alcanza mediante un proceso ajustado en tres etapas clave:

1. Sobre el grado de molienda y la finura óptima (evaluación de la conminución) se determinó que el grado de molienda es un factor crucial en la evaluación metalúrgica, estableciéndose el tiempo óptimo de molienda en 13,18 minutos. Este tiempo permitió alcanzar la finura deseada de 64,66% de material pasante la malla -200, un tamaño de partícula que se considera crucial para la máxima liberación de las especies valiosas, favoreciendo así la posterior recuperación eficiente de cobre, plomo y zinc en la etapa de flotación sin incurrir en una molienda excesiva.
2. Sobre la dosificación óptima de reactivos (recuperación de Cu, Pb y Zn) La dosificación de los reactivos de flotación es un factor determinante y selectivo. Se concluyó que la máxima recuperación para cada metal se logra bajo condiciones de reactivos específicas y distintas, tal como se muestra a continuación:
  - ✓ Cobre (Cu): La máxima recuperación del 85% se obtuvo con una dosificación de  $\text{CuSO}_4$  de 50 g/ton.
  - ✓ Plomo (Pb): La recuperación pico del 70,5% se alcanzó utilizando las dosis más altas de cianuro de sodio (CNNa 150 g/ton) y xantatos (80 g/ton), demostrando la necesidad de una depresión efectiva del zinc.
  - ✓ Zinc (Zn): La mejor recuperación del 56,8% se logró con una dosificación de  $\text{ZnSO}_4$  de 25 g/ton, activando selectivamente el zinc tras la recuperación de cobre y plomo.

Esta evidencia confirma que la evaluación metalúrgica debe ajustarse de manera selectiva para optimizar la separación de cada mineral valioso.

3. Sobre la cinética de flotación (velocidad de recuperación) La cinética de flotación de los minerales polimetálicos del nivel 180 reveló una rápida flotabilidad en las etapas iniciales del proceso. Se determinó que, en los primeros cinco minutos del circuito bulk, se logró una recuperación significativa y acelerada para los metales, indicando una alta eficiencia de extracción temprana:

- ✓ Zinc: 83,20%
- ✓ Plomo: 78,19%
- ✓ Cobre: 72,28%

La velocidad de recuperación observada subraya el potencial para una extracción eficiente y rápida, lo que es fundamental para el diseño y la optimización de los circuitos de flotación industriales.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda optimizar el tiempo de molienda para alcanzar un equilibrio entre la finura del material y el consumo energético. Si bien el aumento del tiempo mejora la reducción del tamaño de las partículas, es importante evitar la molienda excesiva, que podría incrementar el consumo energía sin beneficios adicionales en la calidad del concentrado.

Se recomienda revisar periódicamente la dosificación de reactivos para ajustar su uso según las condiciones del proceso, optimizando así la eficiencia de flotación y la recuperación de minerales valiosos. Un control preciso evitará el exceso de reactivos, mejorando la rentabilidad y reduciendo costos operativos sin comprometer la calidad del concentrado.

Se recomienda optimizar los tiempos de flotación para aprovechar la rápida recuperación del cobre, plomo, zinc y plata en las primeras etapas. Esto permitirá maximizar la eficiencia del proceso, concentrando los metales valiosos rápidamente, mientras se minimizan los tiempos de operación y el consumo de reactivos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. G. (2012). El Proyecto de Investigación Introducción a la metodología científica. Caracas - Republica Bolivariana de Venezuela: Episteme, C.A.
- Astucuri, V. (1994). Introducción a la flotación de minerales. LIMA.
- Avila Huaranga, L. (2019). Evaluacion de flotacion a nivel de planta con colectores secundarios para mejorar la recuperacion de plata en la Unidad Minera Recuperada-Huachocolpa-Huancavelica. Pasco-Peru: Repositorio de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion.
- Azañero, A. (2015). FLOTACION Y CONCENTRACION DE MINERALES. LIMA.
- Baldeon Mora, S. B. (2022). Estudio de Minerales Polimetálicos por Flotación para la Concentración y Valores del Mineral . Huacho - Perú: Repositorio de la Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrión.
- Gonzales, G. C. (2018). Predicción de Resultados Metalúrgicos en Flotación de Minerales mediante Análisis Multivariante y Aprendizaje Automático. Valencia España: Dpto. de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Universidad Politécnica de Valencia.
- Gupta, A. y. (2006). Pruebas de flotación de minerales polimetálicos.
- Hermitanio Ascate Anampa<sup>1</sup>, A. P.-G.-T. (2023). Advances in mineral flotation. Argentina: International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology.
- José Luis, M. L. (2005). Capitulo VIII, Molienda. España: Universidad de Cantabria.
- Peñuelas, M. A. (2010). MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN. Mexico: D.R. Universidad Autónoma de Sinalga.
- Universidad Politécnica de Cartagena. (2006). Tecnología mineralurgia. Colombia: Universidad Politécnica de Cartagena.

Wills, B. y.-M. (2006). Tecnología de Procesamiento de Minerales - Tratamiento de Menas y Recuperación de Minerales. Mexico.

Meza Chacpa, L. (2019). Evaluación metalúrgica en el circuito de flotación para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la planta concentradora Iscaycruz – Oyon, Lima - 2019. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión [Tesis de titulación], Pasco.

Obtenido

de

[http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1419/1/T026\\_70809824\\_T.pdf](http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1419/1/T026_70809824_T.pdf)

## **ANEXOS**

## Instrumentos de Recolección de datos

### Mapa ubicación de la minera Pan American Silver - Unidad Huaron



**Nota: Google Maps**

Localidades	Distancia	Descripción de trayectoria
1. La Oroya -Cerro de Pasco	130 km	Carretera central asfaltada
2. Cerro de Pasco – Huaron	60 km	Carretera Pasco-Huayllay

## BALANCES METALURGICOS

### Balances metalúrgicos simplificados - circuito de cobre

La ley de cabeza para el Cobre fue de 0,24%. A continuación, se muestran los resultados de las 10 pruebas.

Numero de orden	Recuperación	Ley
1	70,1	23,8
2	82,5	28,1
3	77,9	26,3
4	69,8	23,6
5	78,2	26,5
6	74,3	25,4
7	85,0	29,2
8	77,5	26,7
9	75,8	25,1
10	68,3	22,9

### Balance para mayor ley de cobre (prueba 7)

En el caso del cobre, la misma prueba (número de orden 7) resultó tanto en la mayor recuperación como en la mayor ley de concentrado.

Producto	Peso (%)	Ley Cu (%)	Distribución Cu (%)
Alimentación	100,00	0,24	100,00
Concentrado Cu	0,70	29,20	85,00
Relave	99,30	0,04	15,00
TOTAL	100,00		100,00

### Balances metalúrgicos simplificados - circuito de plomo

La ley de cabeza para el plomo fue de 0,64%. A continuación, se muestran los resultados de las 10 pruebas.

Numero de orden	Recuperación	Ley
1	65,2	32,1
2	67,8	33,5
3	59,8	29,5
4	62,5	30,6
5	62,5	31,0
6	70,5	34,8
7	62,0	30,8
8	64,7	31,9
9	61,5	30,5
10	64,2	31,6

### Balance para mayor ley de plomo (prueba 6)

Igual que con el cobre, la misma prueba (número de orden 6) logró tanto la mayor recuperación como la mayor ley para el plomo.

Producto	Peso (%)	Ley Pb (%)	Distribución Pb (%)
Alimentación	100,00	0,64	100,00
Concentrado Pb	1,29	34,80	70,50
Relave	98,71	0,19	29,50
TOTAL	100,00		100,00

### Balances metalúrgicos simplificados - circuito de zinc

La ley de cabeza para el zinc fue de 2,86%. A continuación, se muestran los resultados de las 10 pruebas.

Numero de orden	Recuperación	Ley
1	48,5	39,8
2	56,2	43,1
3	51,8	41,4
4	48,3	39,7
5	52,0	41,5
6	52,7	41,4
7	49,5	40,0
8	46,0	38,3
9	56,8	44,0
10	53,3	42,3

### **Balance para mayor ley de zinc (prueba 9)**

Nuevamente, la misma prueba (número de orden 9) obtuvo tanto la mayor recuperación como la mayor ley para el zinc.

<b>Producto</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Ley Zn (%)</b>	<b>Distribución Zn (%)</b>
<b>Alimentación</b>	<b>100,00</b>	<b>2,86</b>	<b>100,00</b>
<b>Concentrado Zn</b>	<b>3,70</b>	<b>44,00</b>	<b>56,80</b>
<b>Relave</b>	<b>96,30</b>	<b>1,29</b>	<b>43,20</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100,00</b>		<b>100,00</b>

Anexo: Realización de la prueba experimental en el laboratorio UNDAC





## MATRIZ DE CONSISTENCIA

<b>“Evaluación Metalúrgica de Minerales Polimetálicos del nivel 180, para la Recuperación de Cobre, Plomo y Zinc en la Empresa Minera Pan American Silver, Pasco 2023”</b>					
<b>PROBLEMA GENERAL</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPOTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>POBLACION Y MUESTRA</b>
¿Cómo influye la evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos del nivel 180 en la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023?	Realizar la evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc en la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023.	La evaluación metalúrgica de los minerales polimetálicos del nivel 180 permitirá mejorar los parámetros de flotación, incrementando la recuperación de cobre, plomo y zinc, mejorando la eficiencia del proceso metalúrgico.	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>  Evaluación metalúrgica de minerales polimetálicos		
<b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>HIPOTESIS ESPECIFICAS</b>			
¿Cuál es el grado molienda de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc de la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023?	Determinar efecto del grado molienda de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc de la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023.	Si determinamos que un mayor grado de molienda de los minerales polimetálicos del nivel 180 incrementará la recuperación de cobre, plomo y zinc, mejorando la eficiencia del proceso de flotación.	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>  Recuperación de cobre, plomo y zinc	Tipo de investigación aplicada - tecnológica. Nivel explicativo. Población: mineral de la zona baja nivel 180 Muestra sub grupo de la población proporcionada por la empresa Pan American Silver Huaron	Población: Mineral del nivel 180 de la empresa Pan American Silver Huaron.  Muestra: 70 kilogramos de mineral representativo.
¿Cuál es el efecto de los reactivos en la flotación de minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc de la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023?	Determinar el efecto de los reactivos en la flotación de minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc de la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023.	Si determinamos que la correcta selección de reactivos en la flotación de minerales incrementará la recuperación de cobre, plomo y zinc, mejorando la eficiencia del proceso.			
¿Cuál es la cinética de flotación de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc de la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023?	Determinar la cinética de flotación de los minerales polimetálicos del nivel 180, para la recuperación de cobre, plomo y zinc de la empresa minera Pan American Silver, Pasco 2023.	Si la cinética de flotación de los minerales polimetálicos del nivel 180 influirá en la velocidad de recuperación de cobre, plomo y zinc, optimizando su separación en las primeras etapas.			